

В. Т. Поляков

Посвящение в радиоэлектронику

Издательство «Радио и связь»

В. Т. Поляков Посвящение в радиоэлектронику



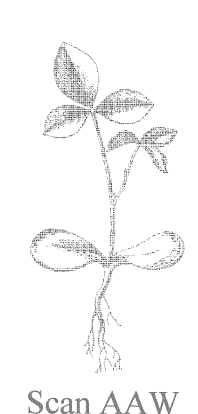
Основана в 1947 году
Выпуск 1123

В. Т. Поляков

Посвящение в радиоэлектронику



Москва
«Радио и связь»
1988



ББК 32.84
П54
УДК 621.38:001.92

Рецензенты: канд. техн. наук В. М. Богачев и доктор техн. наук Л. М. Финк

Поляков В. Т.

П54 Посвящение в радиоэлектронику.– М.: Радио и связь, 1988.– 352 с.: ил.– (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1123).

ISBN 5-256-00077-2

Популярно рассказано об основных достижениях радиоэлектроники – от радиовещания и телевидения до сложных вычислительных комплексов и систем. На многочисленных примерах показана все возрастающая значимость радиоэлектроники в современном мире. Даны сведения о физических основах, принципах действия и устройстве радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов.

Для широкого круга радиолюбителей.

П $\frac{2402020000\text{-}034}{048(01)\text{-}88}$ КБ-27-9-87 ББК 32.84

ISBN-5-256-00077-2

От автора

Когда-то был каменный век, потом – бронзовый, прошлое столетие называют веком пара и электричества, а как же назвать наше время? Одним-двумя словами не обойдешься: век атома, космический век, век связи и управления... На рубеже прошлого и нынешнего столетий изобретено радио. Теперь мы не мыслим жизни без радио и телевидения. На основе быстро развивающейся радиотехники и использования достижений многих наук возникла радиоэлектроника и очень скоро стала незаменимой практически во всех сферах человеческой деятельности.

Термин «радиоэлектроника» появился в 50-х годах нашего столетия. Он объединяет обширный комплекс областей науки и техники, связанных с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью электрических колебаний и электромагнитных волн. Радиоэлектроника включает радиотехнику, электронику и ряд новых областей: квантовую электронику, оптоэлектронику, полупроводниковую и микроэлектронику, акустоэлектронику и др.

Интерес к радиоэлектронике огромен. Люди хотят больше знать о радиоэлектронике и шире использовать ее достижения. Как это сделать? Круглосуточное прослушивание электронной музыки и многочасовое сидение перед телевизором нисколько не пополнят ваши знания по радиоэлектронике (исключением могут служить научно-популярные передачи). Штудировать учебники? Неплохой способ, но читать совершенно незнакомый и достаточно сложный учебник занятие трудное. В редкие часы досуга возникает вполне понятное желание почитать что-нибудь легкое, способное вызвать живой интерес и в меру развлекательное.

Перед вами книга о радиоэлектронике, не учебник, не монография и не систематическое изложение «основ». Она написана для тех, кто еще мало знает о радиоэлектронике, но хотел бы узнать о ней больше. В то же время люди заинтересованные, специалисты и радиолюбители, найдут в книге немало полезного и интересного. Книга не даст вам систематических знаний по радиоэлектронике, но послужит как бы введением в эту область науки и техники. И кто знает, может быть, вы впоследствии с таким же интересом будете читать серьезные учебники, монографии и справочники! Очень хотелось бы именно в такой мере заинтересовать вас радиоэлектроникой. Но если даже, открыв эту книгу, вы не отложите ее, а дочитаете до конца, автор будет считать свою задачу выполненной.

Разумеется, текст лучше читать с самого начала. Но при желании можно начать чтение с конца или середины. По оглавлению легко найти раздел, который вас больше всего интересует. В популярной книге очень трудно, если не сказать, совсем невозможно дать полные сведения по всем затронутым вопросам. Остается лишь адресовать читателя к другой, более солидной литературе. Сначала

предполагалось дать в конце книги ее список. Я его уже начал составлять, но он все рос и рос, ведь литературы по радиоэлектронике чрезвычайно много – от популярных брошюр, понятных школьнику, до сложных монографий, разобраться в которых нелегко даже специалисту. Поэтому от списка литературы пришлось отказаться. В несуществующий список литературы хотелось включить еще и учебники физики за 6–10-й классы, но, вероятно, напоминаниями о необходимости знакомства с ними вам уже надоели в школе. Тем не менее в книге не хотелось повторять изложенный в них материал. Ну а если у вас возникнут некоторые сложности при осмысливании текста, обратиться еще раз к этим учебникам никогда не будет поздно.

В работе над книгой автору немало помогли лекции, которые он читал студентам нерадиотехнических специальностей. Большинство их имело весьма смутное представление о радиоэлектронике, а лишь опираясь на ее основы, можно было говорить о предмете курса. Приходилось как можно короче и популярнее рассказывать о радиоэлектронике, на что тем не менее уходила львиная доля времени, отведенного для занятий. Но что поделаешь! Без знания основ радиоэлектроники часто нельзя изучить предметы, казалось бы, и не имеющие к ней прямого отношения.

От редакции

Автор предлагаемой книги – Владимир Тимофеевич Поляков, кандидат технических наук, доцент, в 1963 году окончил Московский физико-технический институт (МФТИ) по специальности «Радиотехника», работал в промышленности, в 1968 году окончил аспирантуру МФТИ по специальности «Радиофизика» и защитил кандидатскую диссертацию. Более десяти лет преподает курсы физики и основ дистанционного зондирования в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Он автор более 100 опубликованных работ и 10 изобретений, среди которых четыре популярные брошюры и много статей для радиолюбителей. Со школьных лет он является радиолюбителем. Разработанные им конструкции пользуются популярностью среди радиолюбителей. С его работами связывают широкое распространение приемников прямого преобразования (гетеродинных приемников) для любительской радиосвязи.

1. ВСЮДУ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

В этой главе автор уподобляется тому нудному собеседнику, который на вопрос: «Как дела?» – подробно рассказывает о них. В ней автор напомнит читателю о мире, в котором мы с вами живем, и постарается показать, что он все больше становится миром электроники.

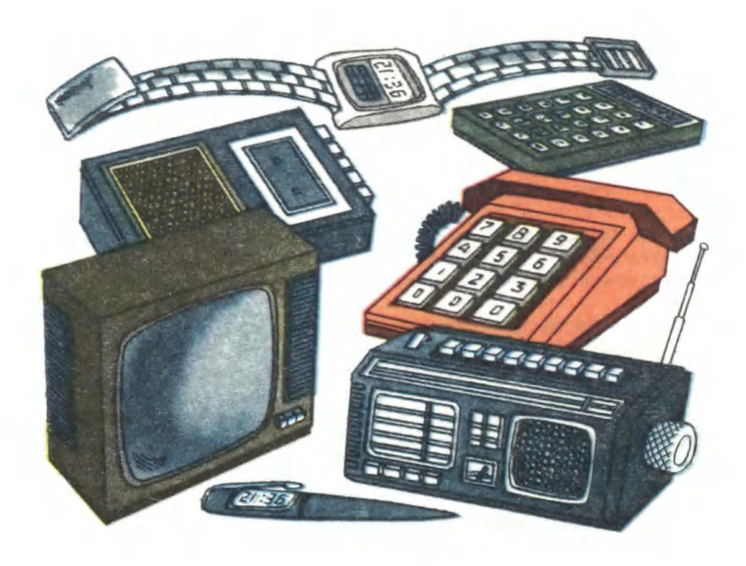
Как популярно рассказать об электронике?

Задал этот вопрос и задумался: с чего начать? Посмотрел на часы. Они показывали 21:18. Мерно мигали секундные точки. Выключился левый нижний сегмент у восьмерки и стало 21:19. В свете настольной лампы цифры на жидкокристаллическом индикаторе часов видны очень контрастно, а проводники, идущие к сегментам цифр, разглядеть трудно. Каким же тонким должен быть слой металла, напыленный на стекло, чтобы быть прозрачным! Пока разглядывал часы, снова включился левый нижний сегмент последней цифры и выключился средний. Получился нуль. Предпоследняя цифра из единицы превратилась в двойку – 21:20. Как же это все происходит? Об этом я и расскажу в одной из следующих глав. А что сказать сейчас? Потянулся к стоящему на столе маленькому транзисторному приемнику. На средних волнах уже началось дальнее прохождение (днем его не бывает). Ленинград передавал классическую музыку, Киев – последние известия на украинском языке, Бухарест – рок-концерт, Анкара – лирические турецкие мелодии. В эфире жизнь била ключом!

Снова взялся за ручку. Написал несколько слов – опять разбежались мысли. Может быть попробовать сначала диктовать текст в микрофон магнитофона? Достал магнитофон, благо, что они теперь маленькие, портативные. Поставил кассету. Пока размышлял над тем, что сказать, часы уже показывали 21:36. Кончилась программа «Время», передаваемая Всесоюзным телевидением, и начался художественный фильм. Домашние, которым совсем неведомы мои творческие муки, зовут смотреть телевизор. Все! Завтра звоню в редакцию, для этого достаточно нажать всего одну кнопку – телефон редакции давно записан в электронной памяти телефонного аппарата, и отказываюсь от книги.

Читателю, видимо, уже ясен вывод из написанного. Многое из того, что нас окружает,– электронные приборы или имеющие какое-то отношение к электронике. Но есть исключения (например, авторучка).

Много лет назад мне довелось прочесть научно-фантастический рассказ, в котором главный герой, пытаясь усовершенствовать



авторучку, сначала снабдил ее запасом чернил на двести лет, затем перешел к диктофонам и, наконец, к аппарату, записывающему непосредственно мысли. И что же записал этот аппарат? Мысли автора, не имеющие никакого отношения к сочиняемому рассказу: как бы не село напряжение в сети, что и как надо усовершенствовать в конструкции аппарата и тому подобное. Значит, авторучка все-таки важна. Она служит как бы фильтром, пропускающим на бумагу не весь сумбур мыслей автора, а только то, что нужно именно для сочиняемого рассказа. Пожалуй, фильтрует все-таки не ручка, а сам автор, но ручка в немалой степени способствует этому процессу, благодаря своей ограниченной «пропускной способности», ведь она порой не поспевает за мыслью автора.

И фильтрация, и пропускная способность – термины, имеющие непосредственное отношение к радиоэлектронике. Благодаря фильтрам радиоприемник воспроизводит передачу только одной радио-



станции, а не всех сразу, телевизор дает четкое изображение, передаваемое только по одной программе, а когда вы пользуетесь электробритвой, изображение не превращается в мешанину цветов и зигзагов. Что? У вас именно так и происходит? Электробритва создает помехи телевизионному приему? Искрит коллектор мотора в электробритве? Искры возбуждают электрические колебания, которые через проводку сети попадают в телевизор? Проверьте исправность фильтров в электробритве и телевизоре – помеха наверняка будет устранена. Но мы отвлеклись, сейчас разговор не о том, как отремонтировать телевизор (хотя это не менее важно и не менее интересно, и читатель, наверное, этому научится), а о том, как написать популярную книгу по радиоэлектронике.

Процесс этот в общих чертах уже ясен: каждую фразу нужно сформулировать и отредактировать в уме, записать на бумагу, еще раз отредактировать и переписать в окончательном виде. Правда, когда «окончательный» вариант страницы будет готов, его, возможно, еще раз придется переделать или совсем выкинуть – процесс творчества нескончаем... Автоматизировать эту работу в настоящее время уже можно, разумеется, с помощью электроники. Более того, подобные устройства разработаны. Представьте себе небольшой телевизионный экран (дисплей), а перед ним клавиатуру. Дисплей заключен в металлический корпус, покрашенный неброской серой краской. Рядом стоит прямоугольная металлическая коробка, соединенная кабелем с дисплеем. Это микроЭВМ (электронно-вычислительная машина). Размеры последних моделей микроЭВМ невелики – часто ее размещают в одном корпусе с дисплеем, и все устройство занимает объем немногим больше объема пишущей машинки. МикроЭВМ способна обработать и запомнить довольно много информации, например несколько страниц машинописного текста. Если нужно запомнить больше, к ЭВМ присоединяют обычный магнитофон, приспособленный для записи и воспроизведения цифровой информации.

Давайте поработаем на таком устройстве. Включили. На экране дисплея появился светлый прямоугольник – курсор. Он в левом верхнем углу. Нажимая клавиши, набираем первую фразу. Как легко они нажимаются! Под клавишами нет рычагов, как у механической пишущей машинки, а только небольшие электрические контакты. Чуть дотронулся до клавиши – и на экране появляется желаемая буква. А курсор сдвинулся на один шаг вправо и стал показывать место, где появится следующая буква. Кончилась строка – курсор автоматически перескакивает на следующую. Надо оставить место или пропустить строку – сдвиньте курсор в нужную сторону и печатайте. Быстро и бесшумно вы напечатали страницу. Весь текст в цифровой форме находится в памяти ЭВМ и воспроизводится на экране дисплея. Прочитали. Получилось плохо. Подводим курсор к букве или слову, которое надо стереть, и нажимаем кнопку стирания. Букв как не было! Заполняем пустое место новым текстом. Не умещается? Пожалуйста, не беспокойтесь, пишите! Продолжение текста сдвинется вправо по строке, освободив место для вносимого исправления. Не уместилось на строке – освободится другая. Наконец страница переделана, все исправления внесены. Пора перенести эту «электронную страницу» на бумагу. Ничего нет проще! Подключаем к ЭВМ буквопечатающее устройство, похожее на пишущую машинку без клавиатуры, вставляем в него лист бумаги и нажимаем кнопку вывода информации на печать. Пока все. Отдыхайте, если это вам удастся, потому что из печатающего устройства, или терминала, как

часто называют самые разные оконечные устройства ЭВМ, раздаются «пулеметные очереди». Негромкие, но «скорострельные». Полминуты – и страница отпечатана! Сочиняйте следующую! Вот так эту книгу можно было бы написать, пользуясь современными достижениями электроники.

Когда писались эти строки, персональных ЭВМ не было ни у автора, ни у кого-либо из его знакомых. Но успехи электроники стремительны, и положение может измениться уже к моменту выхода книги в свет!

Утро вечера мудренее

Расставшись с вечерними мыслями об электронике, утром я был в институте. Лаборатория, в которой я работаю, занимается физикой моря. Во время экспедиций мы измеряем соленость, температуру воды, потоки тепла между океаном и атмосферой, скорость ветра у поверхности воды и другие параметры. В остальное время анализируем результаты измерений. Это необходимо, и я кратко расскажу зачем. Наша планета Земля обогревается Солнцем. Но максимальный поток солнечного тепла попадает в экваториальные области. Там солнечные лучи падают отвесно и хорошо поглощаются, но не атмосферой, потому что атмосфера прозрачна, а океаном. Суша поглощает меньше тепла, так как, во-первых, ее площадь меньше площади океанов и, во-вторых, ее отражательная способность выше и часть лучистого потока отражается обратно в космос. Итак, нагревается вода. От нее нагревается воздух, причем в атмосферу переносится и тепло, и водяной пар. Как говорят ученые, происходит энергомассообмен между океаном и атмосферой. Течения в океанах и ветры в атмосфере разносят тепло по всему земному шару. Так «делается погода». Сто́ит в Атлантическом океане теплому течению Гольфстрим повернуть чуть-чуть западнее, и у нас – суровая зима, чуть-чуть восточнее – дождливое лето. Только не примите данное высказывание за конкретную практическую рекомендацию! Это пример, показывающий влияние одного из факторов на климат. Для сколько-нибудь уверенного прогноза погоды необходимо учесть еще массу факторов: аномалии температуры, ветров, течений, барических полей (распределение давления атмосферы) и т. д.

Если бы еще Земля была неподвижной! Но она, как справедливо заметил Галилео Галилей, все-таки вертится. Поэтому ветер, задувший на восток, силой Кориолиса, возникающей из-за вращения Земли, отклоняется к югу. По этой же причине все реки в северном полушарии подмывают правые берега, а в южном – левые, области низкого давления в атмосфере долго не могут заполниться – ветры дуют по кругу, образуя гигантскую воздушную воронку – циклон. Обыкновенный, не слишком глубокий циклон может, например, определять погоду доброй половины Европы.

Все это, конечно, очень интересно, но какое отношение имеет к радиоэлектронике? Так и я думал, приступая к работе в этой лаборатории. Сразу после создания лаборатории мы начали ее оборудовать. Были нужны приборы. Какие? Конечно, осциллографы, чтобы наблюдать на экране сигналы датчиков температуры, влажности и других параметров, затем – самописцы, чтобы эти сигналы регистрировать, и контрольно-измерительная аппаратура:

генераторы сигналов, вольтметры, ампервольтомметры, а также источники питания. Получается стандартный набор радиоэлектронной аппаратуры!

Как измерить скорость ветра на высоте клотика мачты корабля? Проще всего, казалось бы, подняться на мачту с анемометром. Сам прибор прост: крыльчатка – вертушка и циферблат, как у будильника. Крыльчатка вертится тем быстрее, чем сильнее ветер, стрелка бежит по циферблату. Засекаем по секундомеру промежуток времени, скажем 10 с, и отсчитываем по циферблату анемометра число оборотов крыльчатки за это время. Что может быть проще? Влезаем на мачту каждые 15 мин, поскольку измерения надо производить часто, держа в одной руке чашечный анемометр, в другой – секундомер. Отчаянности-то для этого может быть и хватит, но на мачте холодно, ветер пронизывает до костей, держаться за мачту нечем (руки заняты), а как записывать показания? Выход один: крыльчатку закрепить постоянно на мачте корабля, сделать вместо шестеренок «будильника» электрический датчик оборотов и провести вниз по мачте провода́. А внизу, в тепле, в лаборатории «корабля погоды» установить индикатор скорости ветра, да не механический, а электронный с цифровым отсчетом, чтобы он сразу показывал скорость ветра в метрах в секунду.

Не буду утомлять читателя описанием других датчиков – датчиков температуры и влажности: теперь они тоже электронные и соединяются проводами с индикаторами, расположенными в лаборатории. И здесь электроника! Пойдем дальше – измерять параметры волн вблизи корабля очень плохо, даже если корабль лежит в дрейфе. Он качается и, качаясь, создает собственные волны. Они накладываются на набегающие, возникает интерференция волн, и полная картина волнового поля искажается до неузнаваемости. Нужен буй с автономным волнографом, плавающий где-то вдали от корабля. На буе устанавливают и другие приборы. А как передать информацию на корабль? Конечно, по радио! А зачем тогда корабль? Действительно, вроде бы уже и не нужен. Недавние проекты сбора гидрометеопараметров предусматривают выбрасывание в море до тысячи свободно плавающих буев. Информацию о них собирает по радио специальный спутник. Да, да, искусственный спутник Земли, несколько раз в сутки пролетающий над этими буями и «снимающий» с них накопленную информацию, которая записана на магнитной ленте или в полупроводниковой «памяти» буя. Здесь уже сплошная радиоэлектроника.

Если любого зашедшего в нашу лабораторию спросить, чем здесь занимаются, он посмотрит на наши приборы и, не колеблясь, ответит: радиоэлектроникой. И будет прав. Хотя занимаемся-то мы физикой моря. Подобное вы можете увидеть и в любой другой научной лаборатории, работающей в любой области науки или техники.

И еще один важный момент (опять возвращаюсь в нашу лабораторию). Всю информацию, которую собирают корабли погоды, искусственные спутники Земли, наземные метеостанции, надо обработать. Осмыслить ее невозможно ни одному человеку, ни даже целому коллективу, так ее много. Ну, может быть, коллектив это и сделает – недавно мы закончили обработку результатов позапрошлогодней экспедиции на Каспийское море, но погода с тех пор уже изменилась, и изменялась она каждый день, так что теперь наши данные пригодны лишь для научных выводов и обобщений, для чего, собственно, они и собирались. Текущую информацию надо обрабатывать быстро, только тогда результаты обработки будут

иметь практическую ценность (например, в виде прогноза погоды). Сделать это может лишь сверхбыстродействующий электронный мозг, ЭВМ или компьютер. Здесь уже самая настоящая электроника! Но может быть, в других областях науки и техники все иначе? Давайте посмотрим.

Как найти область науки или техники, где не используется электроника?

Размышляя о книге и об электронике в метро на обратном пути с работы автор подумал: транспорт! Моторы, колеса, электрическая тяга... Это же не электроника, а электротехника! Стал присматриваться и прислушиваться, почитал в последующие дни специальную литературу – одним словом, собрал кое-какую информацию. И что же? В метро широко внедряются электронные автоматические системы управления подвижным составом. Этих систем много, например САММ (система автоведения Московского метрополитена), КСАУДП (комплексная система автоматического управления движением поездов). В эти системы входят датчики скорости и положения поездов, линии связи, управляющие ЭВМ. Машинисту поезда теперь не надо задумываться, в какой момент нажать рукоятку тормоза, чтобы остановить головной вагон в заданном месте. За него это сделает электроника. Обратите внимание, как теперь тормозят поезда метро. Точно, плавно, ошибка при остановке состава измеряется сантиметрами! При разгоне поезда надо последовательно замыкать секции пусковых реостатов и переключать обмотки двигателей. Это тоже делает электронная автоматика, при этом экономя электроэнергию. Что же остается делать машинисту? Наблюдать за посадкой пассажиров, закрывать двери. И обязательно вмешиваться в случае каких-либо неполадок в автоматических системах. Теперь поговаривают уже о полностью автоматическом вождении поездов.

Обратимся к железнодорожному транспорту. Вам никогда не приходилось стоять вечером на пешеходном мостике, перекинутом через большую железнодорожную станцию? Множество путей, прожекторов, море огней разноцветных светофоров, стрелки, пересечения, слияния, разветвления рельсов, кое-где стоят составы, движутся маневровые локомотивы, на большой скорости проносятся транзитные и скорые поезда. Как же во всем этом разобраться? Кажется, ошибись где-то на мгновенье – и строгий четкий порядок превратится в хаос. А ошибаться нельзя: ошибки на железнодорожном транспорте приводят к крушениям.

Всем хозяйством железнодорожной станции управляют маневровый диспетчер и дежурный по станции. Слышны переговоры диспетчерской связи с машинистами поездов. Горит разноцветными лампочками и линиями большой пульт – схема станции. Диспетчер на пульте «набирает» маршрут – определяет путь следования поезда по всему многообразию путей. В соответствии с его командами переводятся стрелки, переключаются огни светофоров, автоматически проверяется занятость путей, и так на всей огромной территории станции. Ошибок быть не должно, и их практически не бывает. А если и ошибется диспетчер, его поправит автоматика. Она не позволит принять, например, приходящий поезд на занятый путь, не даст включить зеленый сигнал светофора сразу после того, как прошел поезд. Надо дать ему время уйти на безопасное расстояние.

Сведения об ушедшем поезде дежурный по станции передает своему коллеге на соседней станции, а движение поезда по перегону контролируют поездные диспетчеры, и так на всем многотысячекилометровом пути следования поезда.

Пока на действующих железных дорогах применяется электромеханическая релейная автоматика. Но уже полным ходом идут работы по замене громоздких и ненадежных реле маленькими и удивительно четко срабатывающими интегральными микросхемами. Думаю, что недалек тот день, когда вся железнодорожная автоматика превратится в электронную. Итак, если необходимо куда-нибудь ехать, мы идем за железнодорожным билетом на нужный скорый поезд.

Подходим к окошку кассы. Теперь в любой железнодорожной кассе Москвы можно купить билет на любой поезд. Поездов сотни, билетов сотни тысяч, но на каждое место в каждом поезде продают только по одному билету! Так кто же помнит, какие билеты проданы, а какие нет? Человеческого мозга для этого явно недостаточно. Все помнит электронный мозг ЭВМ, специально предназначенной для централизованной продажи билетов (системы «Стрела» и «Экспресс»). Вспомните, как поступил кассир, когда вы изложили ему свое скромное желание. Он куда-то (теперь мы знаем, что в ЭВМ) отправил эти сведения и стал ждать. В это время ЭВМ проанализировала запрос, установила наличие свободных мест и выдала ответ на терминал – аппарат, стоящий перед кассиром. Ответ вас устроил, вы сообщили об этом кассиру, он нажал кнопку, и печатающее устройство терминала затрещало, выдавая билет. Сведения о проданном билете отправились обратно в ЭВМ. Электронно-вычислительная машина одна, а кассовых терминалов у нее много, вот поэтому-то и можно купить билет на любой поезд в любой кассе. Роль кассира свелась к тому, чтобы быть посредником между пассажиром и ЭВМ. Вот вам и нет электроники на железнодорожном транспорте!

Поехали. К сожалению, нельзя сходить на экскурсию в кабину машиниста, откуда открывается замечательный вид! Навстречу поезду бегут поля, перелески, деревеньки, полустанки, колеса грохочут по мостам и в туннелях. Электроники и в кабине машиниста предостаточно. На скоростных электропоездах ЭР200 силовые цепи тяговых электромоторов переключаются тиристорами. Тиристор – это полупроводниковый выключатель, способный либо пропускать, либо не пропускать ток, причем очень большой силы. Тиристоры появились сравнительно недавно благодаря успехам полупроводниковой электроники. Для управления тиристорами используются интегральные микросхемы. Электропоезд, оснащенный самой современной электронной техникой, пробегает путь от Москвы до Ленинграда за 4 часа 59 минут. Грузовые поезда водит электровоз ВЛ10у. Он имеет систему автоматического управления рекуперативным торможением. При рекуперативном торможении в контактную сеть возвращается часть электроэнергии, израсходованной на разгон поезда. В этом случае тяговые электродвигатели работают в режиме генераторов, вырабатывая электроэнергию и создавая необходимый тормозящий момент. Нет ли у вас знакомого, хвастающегося своими знаниями в области электротехники? Покажите ему полную принципиальную электрическую схему современного электровоза. Если он не окончил Институт инженеров железнодорожного транспорта, вряд ли он в ней разберется – уж очень она сложна. Честно признаюсь, что я с первого взгляда в ней ничего не понял.

Ну хорошо, и на железных дорогах много электроники. А автомобильный транспорт? На полуторке 30-х годов действительно электроники было немного. Аккумулятор, генератор, фары, прерыватель-распределитель (трамблер) – все это относится к обычной электротехнике. Но заметьте, уже есть реле-регулятор, а это – элемент электронной автоматики. Обратимся к современным автомобилям. Электронная система зажигания, содержащая десяток транзисторов и полупроводниковых диодов, электронный регулятор напряжения, электронные указатели поворотов, электронные системы сигнализации. Электронная автоматика все шире используется на автомобиле. А недавно японцы и весь приборный щиток заменили одним жидкокристаллическим индикатором – дисплеем, подобным тому, что в электронных часах, только гораздо сложнее. Зажиганием и другими системами автомобиля управляет микропроцессор. Он автоматически устанавливает угол опережения зажигания, подачу бензина и другие параметры в соответствии с дорожными условиями и нагрузкой автомобиля. Он одновременно считает и показывает на дисплее число оборотов двигателя, путь, пройденный автомобилем с момента выпуска и с сегодняшнего утра, скорость, расход бензина. Он сосчитает, сколько вам осталось проехать до следующей заправки, и многое другое. И вообще, если вы неэкономично поведете такую машину, дисплей на это укажет. Специалисты установили, что стоимость микропроцессора и сопутствующей электроники очень быстро окупается хотя бы за счет сэкономленного бензина. А уменьшение токсичности выхлопных газов – это уже прямая выгода, не менее важная.

Пусть вы никогда не были и не будете шофером, а к железнодорожному транспорту, кораблям и самолетам, буквально заполненным ранообразнейшей радиоэлектронной техникой, имеете отношение только как пассажир. Допустим, вы занимаетесь обработкой металлов. Вы слесарь, токарь или только собираетесь приобрести подобную специальность. Пока имеется еще немало чисто механических металлообрабатывающих станков, но пройдет немного времени, и первое, с чем вы столкнетесь на производстве, будет станок с числовым программным управлением. Что это такое? Станок как станок, только движение суппорта, подача резца и тому подобные операции на нем полностью автоматизированы. На станке или рядом с ним закреплен небольшой блок с микропроцессором. Контур изготавливаемой детали записан в память блока. Для получения максимальной точности сделано это в цифровой форме. По мере изготовления детали положение резца сравнивается с данными, записанными в памяти, и вводится необходимая коррекция. Токарь, конечно, тоже может запомнить контур детали, но только приблизительно, с низкой точностью. А микропроцессор делает это абсолютно точно, с ошибкой, измеряемой микрометрами. Не нужно пользоваться штангенциркулем для частых замеров размеров детали. Это делают электронные датчики, причем гораздо точнее. В результате повышаются точность и чистота обработки, в значительной степени уменьшается брак. Нужно изготовить другую деталь? Пожалуйста. Изменяется только программа микропроцессора, записанная в цифровой форме, и, может быть, необходимый набор режущего инструмента.

Выплавка стали, добыча угля, руды, прокат металла, хозяйственная деятельность территориально-промышленных комплексов, регионов, республик, вся экономика страны контролируются и управляются большими ЭВМ, разумеется, не без участия людей, и

везде-везде при сборе, передаче, обработке, хранении информации, в системах связи и управления используется электроника.

Пусть вы биолог, медик, врач и считаете себя человеком далеким от электроники. До поры до времени, уверяю вас. Это в прошлом веке врач обходился одним стетоскопом. Теперь мадицина не мыслится без электроэнцефалографа, электрокардиографа, электростимуляторов, ультравысокочастотных терапевтических и тому подобных устройств. Ежегодно вы проходите флюорографическое обследование. Вспомните рентгеновские аппараты-шкафы, начиненные электроникой. Думаю, достаточно перечислять области науки и техники, где широко используется электроника. Она проникает всюду. Лично мне не удалось обнаружить ни одной отрасли народного хозяйства, где бы не использовалась электроника.

Сельское хозяйство, скажете вы? А искусственные спутники Земли, собирающие информацию о созревании сельскохозяйственных культур, о влажности почвы, составляющие карты сельскохозяйственных угодий? А машинно-тракторные агрегаты, строго по междурядьям двигающиеся вдоль поля, направляемые невидимым радиолучом? Фантастика? Уже нет. Такие агрегаты испытаны, есть соответствующие авторские свидетельства на изобретения и конструкторские разработки. Их широкое внедрение – только вопрос времени. Рассказ о применениях электроники можно продолжать бесконечно, а мы здесь упомянули лишь их малую часть. Электронике отводится особая роль в каждой отрасли народного хозяйства, и роль эта сводится к управлению, регулированию, учету, передаче и накоплению данных, обработке информации и тому подобным функциям.

Теперь взглянем на самого себя. У человека есть энергетическая система, для которой пища, вода и кислород воздуха становятся источником жизненных сил, есть двигательные механизмы – мышцы и конечности, есть органы чувств и, наконец, самое главное – голова. Мозг перерабатывает всю информацию, поступающую и из внешнего мира, и от внутренних органов. Мозг управляет работой всех органов, определяет наше поведение во внешнем мире – одним словом, делает человека человеком. Опять автор излагает прописные истины – это же прекрасно всем известно! Вернемся немного назад, к тем механизмам и машинам, которые мы уже упомянули. Электронику в станке, электровозе, системе управления производством, корабле, самолете справедливо называют электронным мозгом, думающей, управляющей частью любой машины.

Так что же самое главное в человеке? Разумеется, важны все органы, но главное – мозг человека, его разум. Так и электроника по мере прогресса науки и техники становится самым главным, самым важным, тонким и часто, можно сказать, разумным элементом любой машины, любого комплекса, любой установки.

Важны для человека и органы чувств, поставляющие нам информацию о внешнем мире. Главный из них – зрение. Глаза поставляют нам около 90% информации. На втором месте – слух (еще примерно 9%). И лишь мизерная часть приходится на долю обоняния, осязания и вкуса. Посмотрим внимательнее, как электроника помогает нашему зрению и слуху. Электронное зрение – телевидение – показывает нам события, происходящие повсюду в мире, а не только в пределах прямой видимости при отсутствии тумана и дождя. Радио позволяет людям услышать друг друга на расстояниях в тысячи и десятки тысяч километров. Не зря же любого робота на научно-фантастических картинках рисуют с антеннами вместо ушей

и телекамерами вместо глаз! Итак, вывод ясен: *электроника – всему голова!*

Возможно, это и слишком смелое высказывание, но пока все движется именно в этом направлении. А почему именно электроника? Может быть, есть и другие средства переработки, запоминания информации, использования ее для целей управления? Есть, конечно. Например, на некоторых двигателях в условиях высоких температур и вибраций успешно используют пневматические системы управления. Возникла и соответствующая область техники – пневмоника. Для хранения информации успешно использовали папирусы, кожаные и берестяные свитки, а тетради, книги, перфокарты и кинопленку широко применяют до сих пор. Но самые современные из этих средств либо органически дополняют электронику, либо просто не выдерживают конкуренции с ней. Чтобы разобраться, почему электронике сопутствует такой успех, посмотрим, что же такое управление, чем и как оно осуществляется и какие понятия ему сопутствуют.

2. УПРАВЛЕНИЕ, СИГНАЛЫ, ИНФОРМАЦИЯ

В этой главе мы поговорим о плотинах, шлюзах и термоэлектронной эмиссии, кострах на башнях и узелках на веревочках, объяснениях в любви, автопилотах и термостатах, двоичном коде, цифровых сообщениях и «плитках» информации, а также о многом другом, имеющем отношение к теме, указанной в заголовке.

Самое простое управление

Попробуйте отвернуть водопроводный кран и пустить холодную воду. Поворачиваем ручку крана, и из него льется струя холодной воды. Разве мы потратили много сил и энергии на поворот крана? Вовсе нет, а струя тем не менее сильная. А если мы откроем ворота шлюза в плотине? Хлынет вода, она приведет в действие гидроагрегат, и тысячи киловатт электроэнергии поступят в единую энергетическую сеть страны. Разве это мы затратили столько энергии? Вовсе нет, мы просто управляли шлюзом.

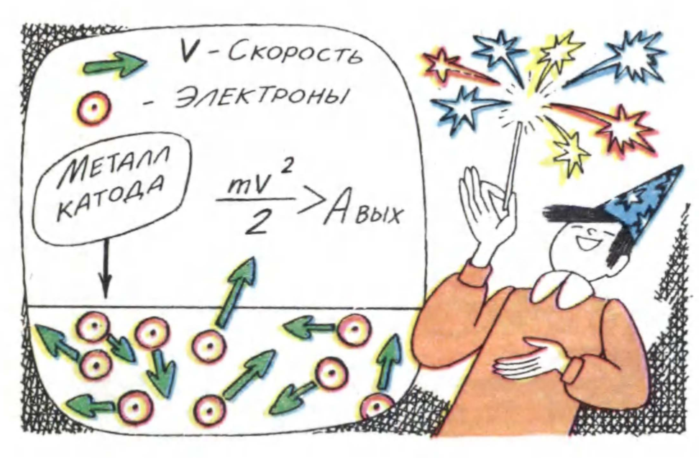
Водитель тяжелого грузовика слегка нажимает педаль акселератора, и многотонная махина резко набирает скорость. Не водитель же ее двигает! Разумеется, двигатель, водитель только управляет. Вы сами можете придумать тысячи примеров непосредственного управления – управления в его простейшем виде.

В школьном курсе физики изучают устройство радиолампы – катод, анод, управляющая сетка... Стоп! Опять управление! Кстати, если английское слово valve – лампа перевести дословно, то получим «клапан» или «кран». Чем же этот «кран» управляет? Не потоком воды, разумеется, а потоком электронов. Накаленный катод лампы испускает электроны. В любом проводнике, а хорошим проводником электрического тока являются металлы, имеется так называемый электронный газ – множество свободных отрицательных элект-



Электронный клапан – триод

рических зарядов – электронов. Атомы металла объединены в общей кристаллической структуре твердого тела, причем внешние электроны атомов, слабее всех связанные со своим «родным» ядром, получают возможность переходить от атома к атому, т. е. блуждать по всему металлу, как киплинговская кошка, которая «гуляла сама по себе». Но покинуть металл электроны не могут, потому что они несут отрицательный заряд. Заряд одного электрона весьма мал: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Тем не менее, если один электрон вырвется из металла, металл приобретет точно такой же по величине положительный заряд. Заряды противоположных знаков притягиваются (обратите внимание, как часто в жизни даже противоположные характеры тянутся друг к другу), и эти силы притяжения как бы втягивают электрон обратно в металл. Работа, которая требуется, чтобы удалить один электрон из металла, называется работой выхода. У разных металлов она разная, поэтому катод радиолампы стараются изготовить из металла с наименьшей работой выхода, например бария. Ну а если такой металл механически недостаточно прочен, его напыляют на более жесткий и тугоплавкий материал



Термоэлектронная эмиссия



На сетке большое отрицательное напряжение

катода, обычно вольфрам. Когда катод разогревается током, проходящим по нити накала, до светло-красного каления, электроны в катоде двигаются быстрее. Они участвуют в тепловом движении — как бы сутолоке атомов, молекул, образующих нагретое вещество. Пока вещество не расплавилось от нагрева, атомы остаются на своих местах в кристаллической решетке, они лишь колеблются все быстрее и быстрее. А вот электронам приходится туго. Как легкие мячики, их швыряют от атома к атому. И при достаточно сильном броске электрон приобретает кинетическую энергию, достаточную для совершения работы выхода. Таким образом, когда кинетическая энергия теплового движения электронов, пропорциональная температуре катода, становится сравнимой с работой выхода, происходит термоэлектронная эмиссия — излучение электронов нагретым катодом.

Анод, заряженный положительно, притягивает и собирает вылетевшие из катода электроны. Несмотря на то, что в баллоне лампы глубокий вакуум, а катод и анод изолированы друг от друга, между этими электродами появляется электрический ток — направленное движение электронов, носителей заряда. Управляющая сетка, помещенная между катодом и анодом, служит тем самым «шлюзом», или «краном». Если сетка заряжена отрицательно по отношению к катоду, она отталкивает электроны, не пропуская их к аноду. По мере уменьшения отрицательного потенциала сетки все большая

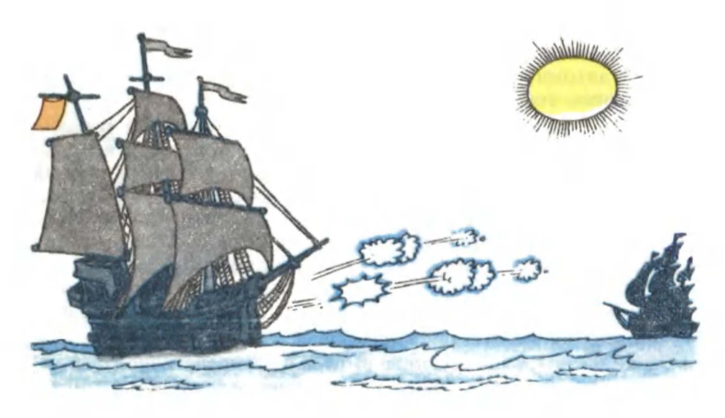


Напряжение на сетке близко к нулю

часть наиболее «шустрых» электронов (обладающих максимальной скоростью) проникает сквозь нее и попадает на анод. Анодный ток при этом увеличивается. При нулевом потенциале сетки почти все электроны достигают анода и анодный ток стремится к максимальному значению. Так действует электронная лампа – подобно вентилю, регулирующему поток воды из крана. Главным достоинством электронной лампы по сравнению с любыми другими вентилями и кранами является исключительно высокое быстродействие. Процесс включения и выключения анодного тока у современных ламп может длиться всего 10^{-9} с, или 1 нс. Благодаря столь высокому быстродействию электронные лампы пригодны для усиления и генерирования колебаний очень высокой частоты, а также для создания быстродействующих управляющих, логических и вычислительных устройств. Правда, в последних из перечисленных областей применения электронные лампы практически полностью вытеснены полупроводниковыми элементами. Тем не менее с помощью электронной лампы можно проиллюстрировать процесс управления, поэтому мы рассмотрели ее так подробно.

Не слишком простое, зато гораздо более эффективное управление

«Капитан взмахнул платком, наколотым на острие шпаги, и канониры тут же поднесли горящие фитили к запальным отверстиям пушек. Борт фрегата окутался густым пороховым дымом, а когда дым рассеялся под порывом свежего северо-западного ветра, люди с преследуемого галиона увидели «Веселый Роджер», взвившийся к ноку бизань-рея фрегата». Нам сейчас неважно, откуда взят этот отрывок, обратите внимание лишь на то, что капитан фрегата сам не прикасался к фитилям, не стрелял из пушек, он только взмахнул платком. И этот взмах послужил сигналом к выстрелу. Управлял ли капитан атакой? Безусловно! Но управление происходило путем сигнализации, что очень существенно. Сигнализация может быть и многозвенной. Например, взмах платка на шпаге капитана видели только командиры батарей, они устно отдавали приказ канонирам (тоже сигнал), а те уже стреляли.



Один из способов сигнализации

«Пушки с пристани палят, кораблю пристать велят». Разумеется, вы знаете, откуда эта строка. Здесь все происходило наоборот – выстрел пушки послужил сигналом к повороту корабля и предпринятию ряда действий для его швартовки у пристани. Здесь ясно усматривается управление кораблем посредством сигнализации. Классический пример передачи сигналов – костры на сторожевых башнях, зажигавшиеся при приближении неприятеля. Этот примитивный световой телеграф был очень распространенным средством связи и в древней Осетии, и на Руси, и в Литве и во многих других местах. Существенным недостатком такого телеграфа было лишь то, что днем его эффективность резко падала. Днем приходилось переходить на другой вид сигналов: либо разводить густой дым, либо махать с башни уже не платками, а большими флагами. Кстати, флажный семафор на флотах с успехом просуществовал долгое время. Скорость передачи сообщений с помощью костров на башнях была удивительно велика, например для передачи сообщения вдоль всего балтийского побережья требовалось менее часа. Ну а где же здесь управление? Да на всех этапах процесса передачи: маленькая искра, высеченная кремнем, управляла зажиганием большого огня костра, свет одного костра управлял зажиганием другого, и, наконец, свет последнего костра управлял, говоря современным языком, мобилизацией войск.

После второй мировой войны сформировалась новая наука – кибернетика, занимающаяся вопросами управления. Ее создателем был Норберт Винер. Слово «кибернетика» – древнее, оно встречалось еще у Платона и обозначало искусство управлять кораблем. Известный французский физик Ампер, именем которого названа единица силы тока, называл кибернетикой науку об управлении государством.

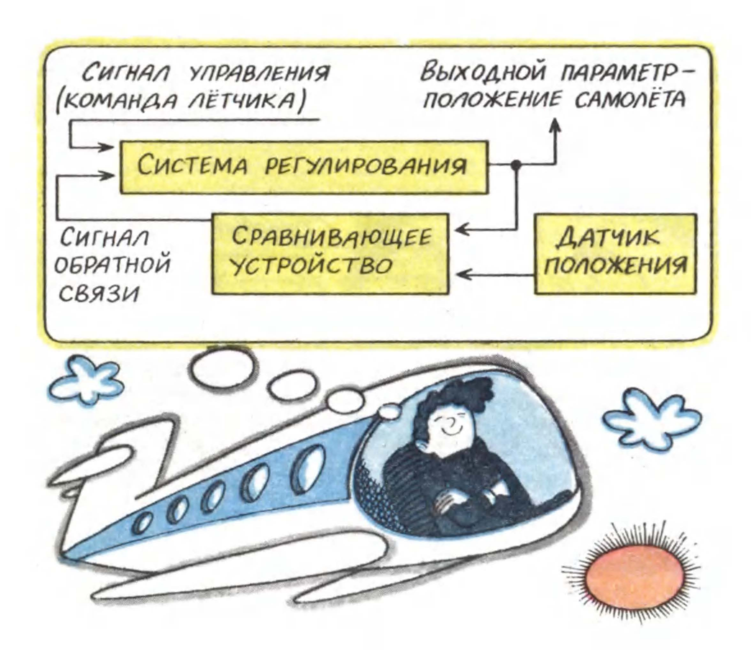
В настоящее время кибернетика занимается математическим описанием процессов управления в машинах, механизмах, сложных, в том числе и электронных, системах, живых организмах. Кибернетика – наука об общих законах получения, хранения, передачи и переработки информации. Основной объект исследования – так называемые кибернетические системы, рассматриваемые абстрактно, вне зависимости от их материальной природы. Примеры кибернетических систем – автоматические регуляторы в технике, ЭВМ, человеческий мозг, биологические популяции, человеческое общество и т. д. Современная кибернетика состоит из ряда разделов, представляющих собой самостоятельные научные направления. Теоретическое ядро кибернетики составляют теория информации, теория алгоритмов, теория автоматов, исследование операций, теория оптимального управления, теория распознавания образов.

Разумеется, рассматриваемые кибернетикой процессы гораздо сложнее, чем, скажем, процесс управления водопроводным краном, хотя и он не так уж прост, как это может показаться на первый взгляд. Давайте откроем и закроем кран. Одновременно внимательно проследим за своими действиями. Открывая кран, мы смотрим на струю воды и отмечаем ее интенсивность. Отвинчивать рукоятку крана мы прекратим, когда решим, что поток воды достаточен. Вы заметили, что имеется обратная связь: интенсивность струи воды влияет на принятие нами решения – открывать кран дальше или нет.

Подобные процессы происходят и в любой другой системе управления. Органы, планирующие выпуск и распределение товаров, обязательно должны иметь информацию об их наличии в магазинах, на складах, у населения. Иначе может случиться, что будет их избыток в одном месте и недостаток – в другом.

На старых самолетах при вхождении в пике́ пилот, отклоняя от себя штурвал, или ручку управления, должен был внимательно следить за положением самолета относительно горизонта, чтобы пикирование не превратилось в отвесное падение или самолет не вошел в «штопор». На современных самолетах имеются приборы (гировертикали или гирогоризонты), автоматически определяющие положение фюзеляжа самолета в пространстве. Сигналы этих приборов воздействуют на рули управления таким образом, чтобы выдерживался заданный летчиком угол пикирования. Комплекс устройств, обеспечивающих автоматическое ведение самолета с заданными скоростью, курсом и высотой, называют автопилотом. Примерная структурная схема устройства автопилота, обеспечивающего регулирование только одного параметра, например курса самолета, показана на рисунке.

При появлении сигнала (летчик повернул штурвал на некоторый угол) система управления заставляет отклоняться рули самолета, и его курс изменяется. Датчик положения вырабатывает сигнал, соответствующий новому курсу, а сравнивающее устройство контролирует, достиг ли этот сигнал требуемого значения, и, если нужно, вносятся коррективы. Как только самолет лег на нужный курс, сигнал обратной связи, вырабатываемый сравнивающим устройством, прекращает действие сигнала управления и система управления устанавливает рули в нейтральное положение. Особое значение имеет обратная связь для автоматического поддержания заданного курса. Допустим, что никакого сигнала управления от летчика не поступало, но курс самолета несколько изменился (подул боковой

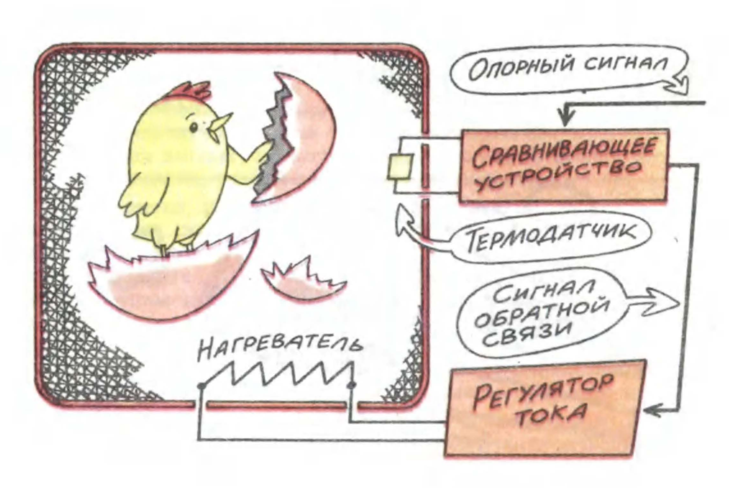


Автопилот

ветер или на пути попалась «воздушная яма»). Датчик положения немедленно отреагирует на изменившееся направление полета, и сравнивающее устройство выработает сигнал ошибки. По цепи обратной связи он поступит в систему управления, а она повернет рули самолета и скорректирует курс.

Другой пример – автоматическое устройство для поддержания заданной температуры – термостат. Он используется и в аппаратуре для тонких биохимических исследований, и в высокостабильных кварцевых генераторах, и в инкубаторах для выведения цыплят. Температура внутри устройства контролируется датчиком, например терморезистором. Его сигнал сравнивается с опорным, задающим нужное значение температуры. Если температура понижается, сопротивление терморезистора возрастает и сравнивающее устройство вырабатывает сигнал обратной связи, управляющий регулятором тока, который, в свою очередь, включает нагреватель. Но как только температура объекта достигает заданной, нагреватель отключается. Как видим, здесь тоже имеет место управление с обратной связью: регулируемый параметр управляет работой системы управления.

Какова же роль электроники в описанных процессах? Самая непосредственная. Здесь мы имеем дело с сигналами управления, датчиков, обратной связи. Они могут передаваться в различной форме, но главное – чтобы их можно было легко и быстро обработать. Для этого на данном этапе развития науки и техники лучше всего подходят электрические сигналы. Следовательно, все устройства и блоки, показанные на структурных схемах, должны быть электронными. Конечно, в ряде случаев пригодны и очень простые устройства, не содержащие электронных схем. Например, простейший регулятор температуры содержит лишь биметаллическую пластинку с контактами и спираль нагревателя. Благодаря разным коэффициентам линейного расширения металлов, из которых изготовлена пластинка, при изменениях температуры она изгибается, замыкая контакты при остывании и размыкая при нагреве. Точность



Устройство термостата

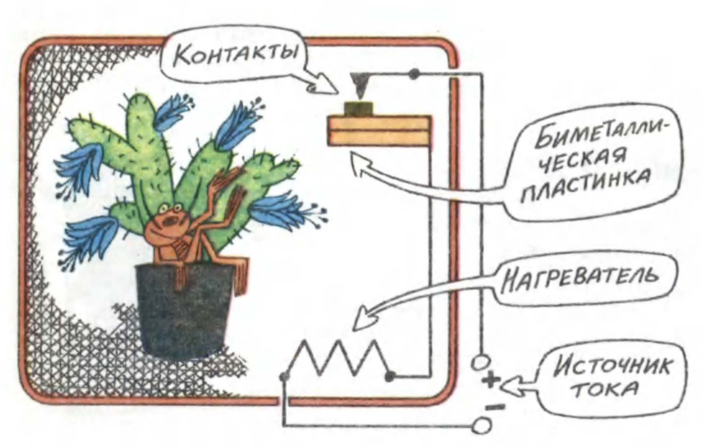
регулирования в таком устройстве невысока и составляет единицы градусов. Как правило, электронный регулятор температуры содержит интегральную микросхему – операционный усилитель, усиливающий слабый сигнал датчика и сравнивающий его с опорным, а также мощные транзисторы и тиристоры, управляющие током нагревателя. В результате получают точность поддержания температуры до сотых долей градуса, а при необходимости – и еще выше.

Итак, *управление осуществляется посредством сигналов.*

Посигнализируем сигналами о сигналах

Я рад, что редактор после долгих споров пропустил этот подзаголовок, не выдерживающий никакой критики с литературной точки зрения. Следовало бы сказать проще: «Поговорим о сигналах». Но само слово «сигнал» имеет общий корень с английским sign, что можно перевести как знак, обозначение. Написанное слово означает некоторое понятие и, таким образом, тоже является сигналом. Ну а передача сигналов, хотя бы и на бумаге,– это сигнализация. Поэтому посигнализируем немного словами-сигналами на тему о сигналах.

Сигналы, передаваемые в электрической форме, обладают множеством достоинств. Во-первых, не требуется движущихся механических устройств, медленных и подверженных поломкам. Во-вторых, скорость передачи электрических сигналов приближается к максимально возможной скорости света. Наконец, в-третьих, электрические сигналы легко обрабатывать, сравнивать и преобразовывать с помощью электронных устройств, отличающихся чрезвычайно высоким быстродействием. Вот почему электрический телеграф, изобретенный в первой половине прошлого века, прочно удерживает свои позиции и не уступает их до настоящего времени в почтовых ведомствах всех стран. Телефон, созданный во второй половине прошлого века, основан на преобразовании механических колебаний



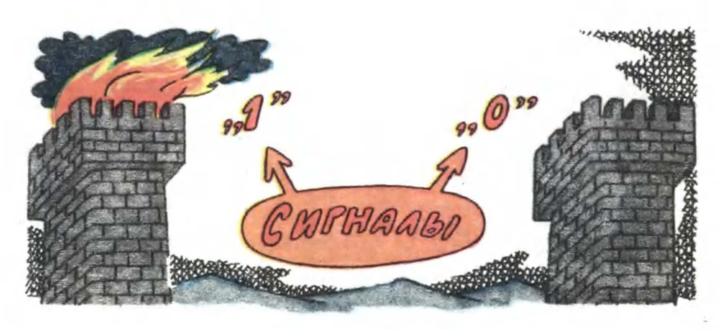
Простейший термостат

частиц воздуха в электрические сигналы. Радио – это тоже передача сигналов, но уже не с помощью электрического тока, текущего по проводам, а с помощью электромагнитных волн, не требующих для распространения какой-либо среды. Радиоволны лучше всего распространяются в космосе, несколько хуже – в атмосфере Земли и совсем плохо – в толщах суши и океанов (там они просто поглощаются, проникая лишь на ограниченную глубину порядка длины волны). Радиоволны – истинные приверженцы свободы и простора; вдали от поглощающих материальных тел, в безбрежных просторах открытого космоса они живут вечно. Я не утрирую. Совсем недавно открыто реликтовое (древнее) излучение, существующее столько же лет, сколько лет и нашей вселенной. Об этом я еще расскажу позже, а сейчас вернемся к сигналам, не внеземных цивилизаций, конечно (они пока не обнаружены, хотя исследования в этом направлении проводятся), а к нашим обычным, земным.

Сигнал в его простейшей форме может принимать два дискретных и вполне определенных значения. Например, на сигнальной башне огонь есть – огня нет. Яркость огня никакого значения не имеет, лишь бы огонь было ясно видно.

В телеграфной азбуке Морзе сигнал тоже может принимать только два дискретных значения: пищит – не пищит, есть ток – нет тока, передатчик излучает электромагнитную волну – не излучает. Кстати говоря, не бывает сигнала, принимающего только одно дискретное значение. Например, если костер на башне жгут постоянно или не зажигают вовсе, то нет никакой возможности узнать, когда же вторгся неприятель.

Во всех разобранных случаях использован простейший двоичный или бинарный код. Наличие сигнала удобно обозначать символом «1», отсутствие – «0». Сигналы, передаваемые двоичным кодом, удобны во многих отношениях. Как и любые цифровые дискретные сигналы, их можно регенерировать, т. е. восстановить, воссоздать их форму, искаженную помехами. Костер, загоревшийся на двенадцатой сигнальной башне, является копией первого костра, зажженного на первой башне, и несет он абсолютно тот же смысл, абсолютно то же сообщение, обозначенное нами символом «1». Не имеет значения, хорошо виден огонь или не очень, что форма костра совсем другая – это влияние помех, которое не сказывается на принятии наблюдателем решения, что костер на предыдущей башне горит. Следствием этого будет регенерация сигнала – зажигание костра на следующей башне. Так же легко регенерировать код

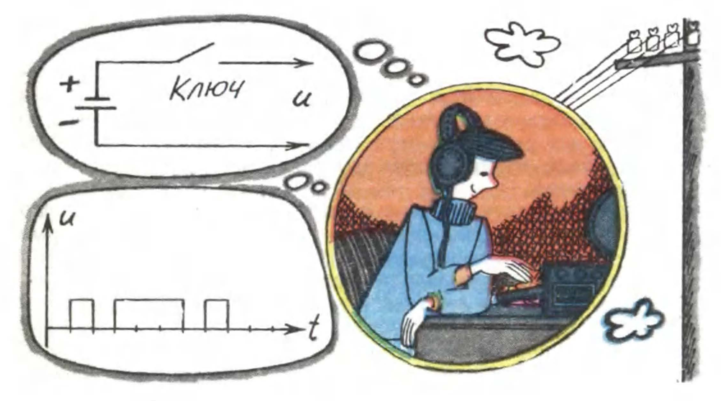


Сигналы

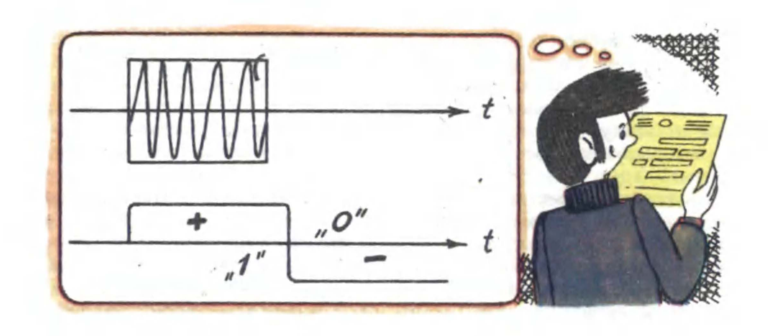
Морзе. В простейшем случае это делает телеграфист – принимает на слух сообщение и отстукивает его ключом дальше по линии. Регенератором служит и телеграфное реле. При наличии посылки тока его контакты замыкаются и формируют новую, уже очищенную от помех посылку тока. Надо ли говорить, что электромеханические реле заменяются более надежными и быстродействующими электронными.

Другое достоинство двоичных цифровых сигналов заключается в том, что они требуют минимального отношения сигнал-помеха в канале связи. Поясним, что это такое. Когда дозорный смотрит на далекую сигнальную башню, ему мешают свет зари, мерцающий свет звезд, расположенных низко над горизонтом, зажигаемый кем-нибудь «посторонний» огонь. Для надежного распознавания полезного сигнала, т. е. света сторожевого костра, надо, чтобы его яркость была больше яркости посторонних помех. Как говорят связисты, отношение сигнал-помеха должно быть больше единицы. То же и в электрическом телеграфе. Провода линии связи «гудят» вследствие атмосферного электричества, электризации трением от ветра, из-за случайных полей геомагнитного происхождения в телеграфных проводах наводится некоторое напряжение помех. Подземные кабели в этом отношении несколько лучше, но они дороже и все равно полностью не избавляют от помех. Даже если нет внешних наводок, тепловое движение электронов в проводнике создает хаотически изменяющееся случайное напряжение – так называемый тепловой шум. Кстати, если это напряжение усилить и подвести к громкоговорителю, мы услышим шум, напоминающий шум примуса, паяльной лампы или сильного дождя. Зачем далеко ходить за примерами, каждый из нас слышал шум и помехи в телефонной трубке! Для надежной регистрации телеграфных посылок их напряжение должно быть больше напряжения шума и помех. Отношение сигнал-шум или сигнал-помеха, требуемое для получения заданного качества связи, оказывается наименьшим при использовании двоичных цифровых сигналов, поэтому говорят, что линии связи, использующие цифровой двоичный код, обеспечивают наибольшую помехоустойчивость.

Другой вид сигналов – аналоговые. Типичный пример – напряжение, развиваемое микрофоном при разговоре перед ним, пении или игре на музыкальных инструментах. Давление воздуха при



Телеграфные сигналы

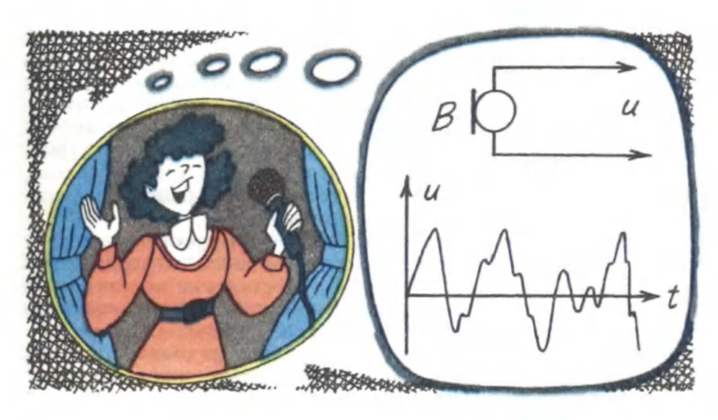


Дискретные сигналы

звучании источника изменяется в небольших пределах относительно нормального атмосферного. Мембрана микрофона, прогибаясь под действием звукового давления, создает некоторое напряжение на выводах звуковой катушки микрофона. Это напряжение прямо пропорционально звуковому давлению, т. е. изменяется аналогично ему, откуда и происходит название «аналоговый сигнал».

Аналоговые сигналы до сих пор используют в телефонной связи, радиовещании и телевидении. Это проще технически, да и история развития радиотехники сложилась так, что первыми стали применяться аналоговые сигналы. Это никоим образом не относится к телеграфу, где всегда господствовала цифра. При передаче аналоговых сигналов требуется значительно большее отношение сигнал-шум, чем при передаче двоичных цифровых сигналов. Пробовали разговаривать в метро? Шум поезда, отражаясь от стенок туннеля, приобретает большую интенсивность. Шум поезда – это помеха. Приходится напрягать голос, чтобы речь была разборчивой. Мощность громких звуков человеческого голоса в 10 000 раз превосходит интенсивность слабых звуков. И это при обычном разговоре. Но слабые звуки не должны маскироваться шумом, чтобы их тоже можно было разобрать. Вот почему приходится напрягать голос в метро, вот почему приходится на аэродроме кричать в ухо собеседнику, когда реактивный лайнер, ревя двигателями, подруливает к аэровокзалу. Для хорошего качества речи, передаваемой по телефону, необходимо обеспечить отношение сигнал-шум по напряжению примерно 100, или 40 децибел (дБ). (Разница уровней в децибелах есть двадцать десятичных логарифмов отношения напряжений.) Опытные радисты могут разобрать речь при отношении сигнал-шум около десяти, но при условии, что передаваемый текст знаком и привычен.

Большим недостатком аналоговых сигналов является и то, что их нельзя регенерировать, поскольку нам не известна их форма (известный сигнал и передавать незачем!). Когда еще лет десять назад вы разговаривали по междугородному телефону, замечали ли, насколько плохим было качество связи? Объяснялось это тем, что слабый речевой сигнал при передаче по проводной телефонной линии необходимо периодически усиливать, скажем через каждые 100 или 200 км. Гудят провода, шумят усилители, и каждый из этих источников помех все больше и больше искажает передаваемый сигнал.



Аналоговые сигналы

Нельзя ли как-нибудь использовать двоичный канал для передачи речи, спросит читатель? Конечно, можно! И такой способ передачи широко используется в настоящее время. Первое, что в этом случае необходимо сделать,– это преобразовать аналоговый речевой сигнал в цифровой код. Затем цифровой сигнал передается по линии связи и регенерируется на каждом из промежуточных усилительных пунктов. Помехи при этом устраняются. А перед подачей в телефонную трубку цифровой сигнал снова превращают в аналоговый. Подобные системы уже внедрены на некоторых междугородных линиях связи. Не обошлось и без курьезов. При первых испытаниях цифровой линии стоило одному из корреспондентов замолчать, как другой принимался кричать: «Алло, алло!», думая, что связь оборвалась. На самом деле он просто не слышал привычного шума линии в паузах речи – столь чистой оказалась передача. Пришлось нарочно добавить немного шума к сигналу на каждом из оконечных пунктов!

Так что же переносят сигналы?

Надеюсь, что читатель сам сможет ответить на этот вопрос. Любой сигнал, будь то свет костра, телеграмма, код Морзе, написанный текст и т. д., несет какое-либо сведение, или сообщение. Одним словом – информацию. Таким образом, *сигнал есть средство передачи информации*.

Любой переданный сигнал переносится либо энергией, либо веществом. Иначе и быть не может, ведь наш мир материален. Это либо акустическая волна (звук), либо электромагнитное излучение (свет, радиоволна), либо лист бумаги (написанный текст), либо каменная скрижаль с выбитыми на ней магическими знаками. Но ни переданная энергия, ни посланное вещество сами по себе никакого значения не имеют, они служат лишь носителями информации. По мере удаления от передатчика поток энергии становится все слабее и слабее. Это тоже не имеет значения до тех пор, пока превышение сигнала над шумом достаточно для приема информации. Когда Москва передает по радио последние известия, одну и ту же информацию получает и подмосковный радиослушатель в г. Долго-

прудном и уральский радиослушатель из Нижнего Тагила. Но поток энергии радиоволн в Нижнем Тагиле в тысячи раз меньше, чем под Москвой. Истрепанная книжка, если в ней нет вырванных страниц, несет ровно столько же информации, сколько такая же новая. Каменная скрижаль весом в три тонны несет столько же информации, сколько ее хороший фотоснимок в археологическом журнале. Следовательно, мощность сигнала, так же как и вес носителя, никак не могут служить оценкой количества информации, переносимой сигналом. Как же оценить это количество?

Во время второй мировой войны подобные вопросы не на шутку заинтересовали шифровальщика при одном из штабов американских войск в Европе К. Шеннона. Упорство в достижении поставленной цели часто приносит успех, и после войны К. Шеннон защитил докторскую диссертацию, став основоположником новой науки – теории информации. В 1948–1949 годах увидели свет его статьи «Математическая теория связи» и «Связь в присутствии шума».

Любое сообщение можно свести к передаче чисел. Пылкий влюбленный, находясь в разлуке с объектом своей любви, посылает телеграмму: «Любишь?». В ответ приходит не менее лаконичная телеграмма: «Да!». Сколько информации несет ответная телеграмма? Альтернатив здесь две – либо *Да*, либо *Нет*. Их можно обозначить символами двоичного кода *1* и *0*. Таким образом, ответную телеграмму можно было бы закодировать единственным символом «1». Выбор одного из двух сообщений («Да» или «Нет», «1» или «0») принимают за единицу информации. Она названа «бит» – сокращение от английских слов binary digit, что означает двоичная цифра. Таким образом, ответная телеграмма несла всего 1 бит информации. А вопрос ценности этой информации для получателя – это уже из иной области.

Однако только что данное определение единицы информации слишком упрощено. Если влюбленный уверен в положительном ответе, то ответ «Да» не даст ему почти никакой новой информации. То же самое относится и к безнадежно влюбленному, уже привыкшему получать отказы. Ответ «Нет» также принесет ему очень мало информации. Но внезапный отказ уверенному влюбленному (неожиданное огорчение) или ответ «Да» безнадежно влюбленному (нечаянная радость) несут сравнительно много информации, настолько



Информация измеряется в битах

много, что радикально изменяется все дальнейшее поведение влюбленного, а может быть, и его судьба! Таким образом, количество информации зависит от вероятности получения данного ответа. Лишь при равновероятных ответах ответ «Да» или «Нет» несет 1 бит информации. Общая формула для подсчета количества информации, содержащегося в сообщении a, выглядит так

$$i(a) = \log \frac{1}{P(a)},$$

где $P(a)$ – вероятность появления данного (дискретного) сообщения a.

Обратите внимание, что для абсолютно достоверного события $P(a) = 1$ (событие обязательно произойдет, поэтому его вероятность равна единице), при этом количество информации в сообщении о таком событии $i(a) = 0$. Чем невероятнее событие, тем бо́льшую информацию о нем несет сообщение.

Но зачем в приведенной формуле использована логарифмическая функция? Нельзя ли проще? Нет, проще не получается. Информация, содержащаяся в двух независимых сообщениях a_1 и a_2, должна быть равна сумме информаций, содержащихся в каждом из сообщений: $i(a_1, a_2) = i(a_1) + i(a_2)$. Логичное требование, не правда ли? Но вероятность того, что источник пошлет оба эти сообщения, одно за другим, равна произведению вероятностей появления каждого из сообщений: $P(a_1, a_2) = P(a_1)P(a_2)$. Как известно, при умножении двух величин их логарифмы складываются. Поэтому и количество информации должно выражаться логарифмической функцией. Ввиду широкого использования двоичных сигналов в вычислительной технике и связи, чаще всего используют логарифм по основанию два. При этом количество информации оказывается выраженным в битах. Если в примере с влюбленными вероятность ответов «Да» и «Нет» одинакова и, следовательно, составляет 0,5, то количество информации в одном ответе составляет 1 бит.

Ну а что если выбор надо осуществить не из двух сочетаний, а из множества? У древних индейцев Центральной Америки существовало узелковое письмо. Писали, завязывая узелки на веревке. Совершенно очевидно, что при таком способе письма можно использовать двоичный код: есть узелок в данном месте – единица, нет узелка – нуль. Если на каждом сантиметре длины веревки разместить по узелку, то метровая веревка будет нести 100 бит информации. Согласитесь, это не так уж мало.

В одном романе Жюля Верна собака, увидев игрушечные кубики с буквами, выбрала из них вполне определенные, с буквами, которые составили имя ее пропавшего хозяина, чем и приоткрыла завесу над тайной его исчезновения. Здесь мы видим выбор определенных знаков из 26, составляющих английский алфавит.

Еще один пример, но теперь из реальной жизни – 1943 год, англо-американские войска готовятся к высадке на итальянский остров Сицилию, занятый фашистскими войсками. В это время в одной из тюрем США сидел очень влиятельный гангстер Лучано, выходец из Сицилии. Американская разведка, пользуясь всяческими средствами, вступила с ним в сговор, пообещав досрочное освобождение. В результате с самолета над Сицилией был сброшен вымпел – шелковый платок с вышитой на нем буквой *L*. Сицилийские мафиози, в то время не ладившие с немецко-фашистскими оккупантами, прекрасно поняли смысл сообщения: Лучано за союзников! Эффект был поразителен – американская армия практически не понесла по-

терь при освобождении Сицилии, так как мафиози основательно помогли ей, начав партизанскую войну против немцев.

Сейчас нас интересует не значимость для истории сообщения на вышитом платке, а лишь количество переданной информации. В английском алфавите 26 букв, добавим еще служебные знаки препинания – всего 32 знака. Значит, осуществлялся выбор одного из 32 знаков. Пример характерен тем, что при передаче любых телеграмм, на любом языке в приемном устройстве происходит выбор одной буквы из алфавита, который чаще всего содержит 32 знака. Если вероятность появления каждого из знаков одинакова и, следовательно, составляет 1/32, то при передаче одного знака сообщается $\log_2 32 = 5$ бит информации. Ту же цифру мы можем получить и иным способом. Перенумеруем все буквы алфавита по порядку. Буква *L* стоит на двенадцатом месте, и ее порядковый номер будет 12. Теперь для выбора этой буквы достаточно передать ее порядковый номер. Число 12, выраженное в двоичном коде, выглядит как 01100. Для передачи любого из 32 чисел двоичным кодом нужно пять разрядов, а любого из *N* чисел – $\log_2 N$. Вы еще не умеете переводить числа из десятичного исчисления в двоичное и обратно? Научитесь, это не так уж сложно! Вам поможет приведенная таблица и простое правило: последний разряд двоичного числа дает единицы (2^0), предпоследний – двойки (2^1), третий разряд справа – четверки (2^2), четвертый – восьмерки (2^3), и т. д. Обозначив символы двоич-

Десятичное число	Двоичное число	Десятичное число	Двоичное число
0	00000	16	10000
1	00001	17	10001
2	00010	18	10010
3	00011	19	10011
4	00100	20	10100
5	00101	21	10101
6	00110	22	10110
7	00111	23	10111
8	01000	24	11000
9	01001	25	11001
10	01010	26	11010
11	01011	27	11011
12	01100	28	11100
13	01101	29	11101
14	01110	30	11110
15	01111	31	11111

ного кода (1 и 0) в последнем разряде x_1, в предпоследнем x_2 и т. д., получим простую формулу для структуры двоичного числа:

$$N = x_1 \cdot 2^0 + x_2 \cdot 2^1 + x_3 \cdot 2^3 + \ldots$$

Для передачи любого числа от 0 до 31 необходимо пять двоичных разрядов, или 5 бит информации. Таким образом, сообщение гангстера Лучано мафиози содержало 5 бит информации.

В народном хозяйстве необходимо передавать значительно больше информации. Не вызовет удивления, например, такая телеграмма, переданная работником снабжения: «В феврале на Чукотку поступило 10 000 грампластинок». Информация здесь такова: во-первых, февраль. Надо думать, поставки товаров подобного рода

производятся ежемесячно, поэтому февраль надо обозначить цифрой 2. Отсюда определяем число двоичных разрядов, необходимых для передачи номера месяца: 4 ($2^4 = 16$, имеется некоторая избыточность информации). Далее необходимо ввести код Чукотки. Пусть соответствующая организация поставляет товары в 120 краев и областей, причем Чукотке ввиду ее удаленности присвоен последний номер. Тогда для передачи кода Чукотки (120) потребуется 7 двоичных разрядов ($2^7 = 128$). После кода области надо указать код товара. Если всего поставляется, например, 512 наименований товаров, то для обозначения грампластинок, скажем № 384, потребуется 9 разрядов ($2^9 = 512$). И наконец, число грампластинок 10000 в двоичном коде займет 14 разрядов. Получаем следующую таблицу:

Вид информации	Месяц поставки	Место поставки	Код товара	Число единиц товара
Слова телеграммы	Февраль	Чукотка	Грампластинки	10000
Десятичный код	02	120	384	10000
Двоичный код	0010	1111000	110000000	10011100010000
Число разрядов двоичного кода	4	7	9	14

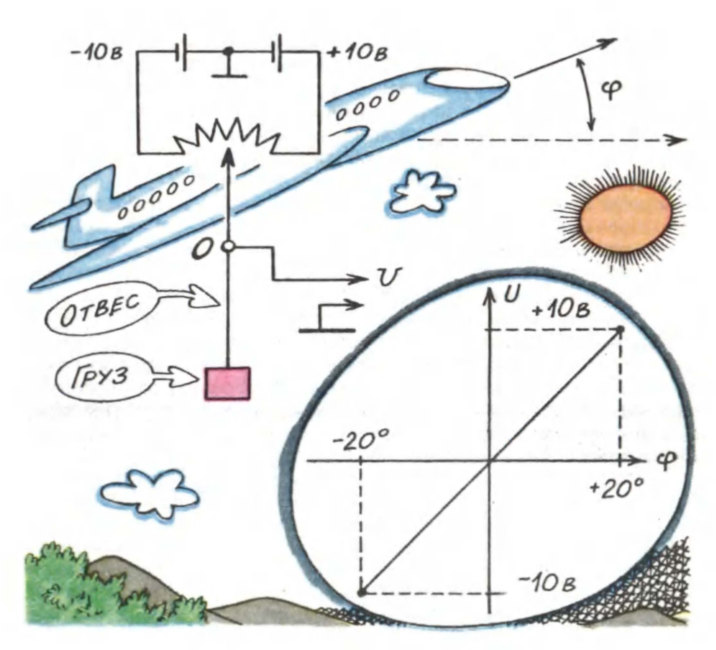
Полное сообщение требует 34 двоичных разряда. Спереди обычно добавляют несколько разрядов служебной информации – адрес, знак начала сообщения и т. д. Последовательность кодов и число разрядов каждого кода, указанные в таблице, должны быть и у отправителя, и у получателя сообщения, чтобы они имели возможность закодировать и раскодировать телеграмму. На линии связи эти процессы автоматизированы, соответствующие устройства называют кодерами и декодерами.

В книгах про разведчиков подобные таблицы называются шифрами и ключами к шифрам, скажет сообразительный читатель, и будет совершенно прав. Надеюсь, что наиболее юные и энергичные из читателей придумывают свои собственные шифровальные таблицы для игры в разведчиков, и их шифры, особенно представленные в двоичном коде, вряд ли расшифрует «неприятель». Итак, мы научились представлять информацию в цифровой форме и определять ее объем. А как быть с аналоговыми сигналами? Раньше их обрабатывали в аналоговой форме, теперь все чаще преобразуют в цифровую.

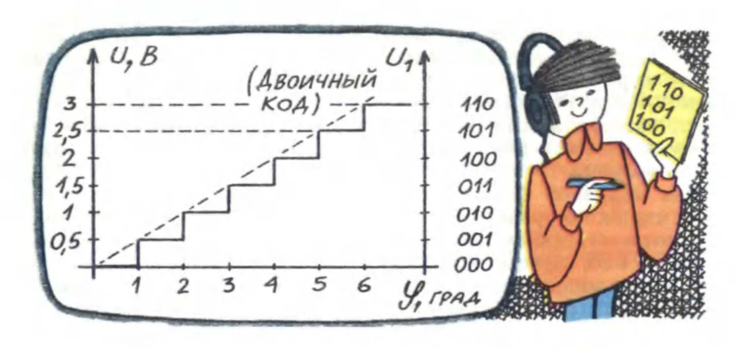
Вспомним автопилот самолета, который мы уже рассматривали, и попробуем сконструировать простейший датчик углового положения фюзеляжа. Возьмем отвес – жесткий стержень с грузом на конце, закрепленный на горизонтальной оси 0. Верхний конец стержня соединим с подвижным контактом потенциометра R, а к крайним выводам потенциометра подключим источники напряжения −10 и + 10 В. Если фюзеляж самолета находится в горизонтальном положении, подвижный контакт будет в середине резистивной подковки потенциометра, а потенциал на нем U обратится в нуль. Стоит самолету наклониться вперед, скажем войти в пике, движок потенциометра переместится влево по подковке и потенциал U станет отрицательным. Если же носовая часть самолета будет

направлена вверх, потенциал U станет положительным. Пусть при наклоне фюзеляжа на угол $\pm 20°$ потенциал U изменяется от $+10$ до -10 В. Крутизна характеристики преобразования угол – напряжение для такого датчика составит 0,5 В на градус. Таким образом мы получим аналоговый сигнал углового положения самолета. Для преобразования этого сигнала в цифровую форму необходимо задаться шагом дискретизации – минимальным изменением напряжения, соответствующим изменению цифрового кода на единицу. Если в нашем простейшем случае достаточна точность $1°$, то шаг дискретизации будет равен 0,5 В. Число шагов дискретизации, на которое изменилось напряжение U, и будет являться углом наклона фюзеляжа, выраженным в градусах. Его значение можно представить и двоичным кодом, как это показано на рисунке. Для преобразования аналоговых величин в цифровой код служат специальные электронные устройства – аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Полученный цифровой код углового положения фюзеляжа поступает в цифровой процессор, выполняющий функции и сравнивающего устройства, и системы регулирования (посмотрите схему на стр. 19). Сюда же поступают сведения и о положении самолета в других плоскостях пространства, и о положении рулей. Процессор вырабатывает сигнал, управляющий рулями. При цифровой обработке информации можно получить значительно большую точность регулирования и управления. Этим и объясняется широкое применение цифровой техники в системах управления.

С какой точностью, например, можно измерить напряжение с помощью обычного стрелочного прибора? Лучшие лабораторные



Датчик углового положения



Дискретизация по уровню

магнитоэлектрические приборы с зеркальной шкалой обеспечивают точность отсчета не более 0,2%, что составляет $2 \cdot 10^{-3}$. В то же время цифровые вольтметры могут иметь пять-шесть разрядов, что обеспечивает точность измерений на два-три порядка (в 100...1000 раз) выше. Но вернемся к проблемам связи, ведь мы так и не закончили разговор о передаче телефонных сигналов цифровым кодом.

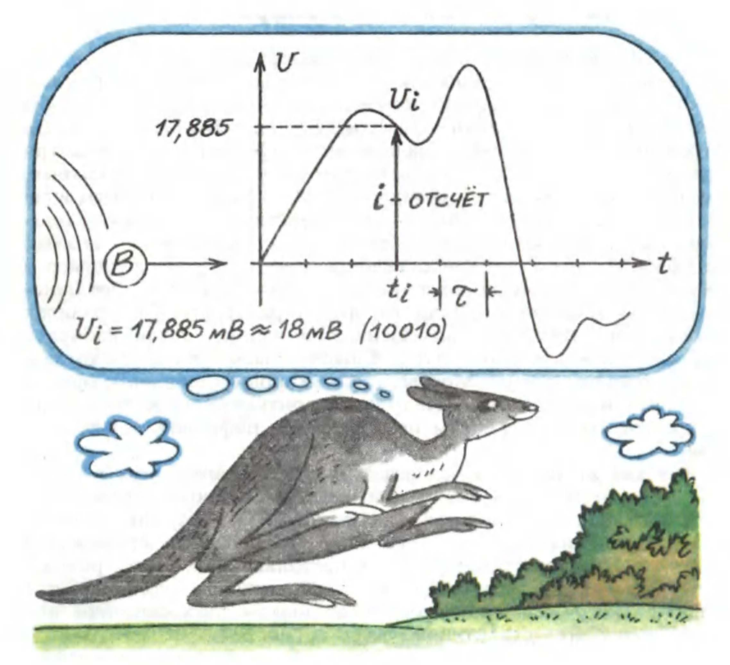
Разговор по телефону в цифрах

Несколько лет назад мне довелось пройти на гидрографическом судне от Владивостока до Петропавловска-Камчатского. Естественно, что из каждого порта я звонил домой, в Москву, чтобы справиться о делах и здоровье близких. Владивосток был еще связан с Москвой старой системой аналоговой телефонной связи. Часа три приходилось ждать, пока телефонистки соединят линию. Наконец, еле еле, сквозь шумы и трески послышался голос жены. Совсем иная картина была в Петропавловске. Там действовала цифровая телефонная связь. Прямо из кабины телефона-автомата можно набрать код Москвы, затем две-три служебные цифры и нужный номер в Москве. Весь процесс занял не более минуты, причем более половины этого времени ушло на то, чтобы разобраться в правилах пользования автоматом, вывешенных в кабине: какие набирать цифры, каких ждать гудков и т. д. Слышно было лучше, чем когда я звонил соседу по дому в Москве, так же хорошо слышали и меня, а помех практически не было. Надо ли говорить, что после состоявшегося разговора я стал ярым приверженцем цифровой телефонной связи.

Так как же обычная человеческая речь превращается в поток цифр, ведь на выводах микрофона имеется быстро изменяющийся речевой сигнал (как показано на рисунке)? А вот как. Берутся отсчеты, т.е. значения этого сигнала через равные промежутки времени τ. Интервал τ должен быть настолько мал, чтобы речевой сигнал не успевал намного измениться между отсчетами. Этот интервал часто называют временны́м шагом дискретизации или интервалом Найквиста. Минимальную частоту взятия отсчетов, т.е. величину, обратную временно́му шагу дискретизации, определяет теорема В. А. Котельникова (академика, основателя теории помехо-

устойчивости систем связи). Частота отсчетов должна быть вдвое больше самой высокой частоты звукового спектра. В телефонии принято передавать частоты только до 3400 колебаний в секунду, т. е. до 3,4 кГц. При этом разборчивость речи еще очень хорошая. Значит, частота взятия отсчетов должна быть не менее 6800 в секунду, или 6,8 кГц. Процесс взятия отсчетов называют дискретизацией по времени.

Для цифровой оценки отсчетов нужен следующий процесс – дискретизация по уровню. Каждый отсчет можно представить числом, соответствующим значению отсчета звукового напряжения. Например, если звуковое напряжение измерять в милливольтах, то число целых милливольт и будет отсчетом, а один милливольт – шагом дискретизации по уровню. Ошибка квантования по уровню в данном случае не превзойдет половины шага квантования, т. е. 0,5 мВ. Отношение максимальной амплитуды звукового напряжения к шагу квантования дает максимальное число, которое можно получить при отсчетах. Оно определяет динамический диапазон передаваемого сигнала. Для передачи телефонной речи с удовлетворительным качеством достаточен динамический диапазон (отношение максимального уровня сигнала к минимальному) 30...35 дБ, что соответствует числу шагов квантования при отсчетах 30. Для передачи одного отсчета двоичным кодом в этом случае достаточно $\ln_2 30 \approx 5$ разрядов. Для хорошей передачи музыки это число, число шагов квантования по уровню, должно быть не менее 10 000, что соответствует динамическому диапазону 80 дБ. В этом случае для передачи одного отсчета потребуется $\log_2 10\,000 \approx 14$ разрядов.



Преобразование аналогового сигнала в цифровой

Наконец мы можем оценить поток информации при телефонном разговоре. Полагая полосу звуковых частот равной 3,4 кГц и частоту взятия отсчетов 6,8 кГц, получаем количество отсчетов в секунду 6800. При 30 шагах квантования по уровню каждый отсчет занимает 5 разрядов. Следовательно, в секунду передается 34 000 двоичных разрядов, или бит информации. Скорость передачи информации, измеренную в битах в секунду, можно выразить формулой

$$C = 2F\log_2 N,$$

где F – наивысшая частота звукового спектра; N – число уровней квантования.

Перейдя на цифровую передачу, мы существенно улучшили качество связи. Но не даром же это досталось! Чтобы передать цифровой сигнал со скоростью 34 кбит/с, нужна полоса частот, пропускаемых каналом связи, не менее 34 кГц. А теперь вспомним, что для передачи обычного аналогового телефонного сигнала требуется полоса частот всего 3,4 кГц. Таким образом, цифровые системы связи оказываются широкополосными. Происходит как бы обмен полосы частот на отношение сигнал-шум, но обмен достаточно выгодный. Расширяя полосу частот в десять раз при переходе к цифровой передаче, мы намного снижаем допустимое отношение сигнал-шум, или сигнал-помеха, в канале связи, и это при общем существенном улучшении качества.

Скорость передачи 34 кбит/с достаточно большая, но надо учесть, что при телефонном разговоре с речью как таковой передаются и интонации голоса, и эмоциональная окраска, что хорошо знают все, кто разговаривал друг с другом по телефону, да и не только по телефону. Телеграф, к сожалению, таких нюансов передать не может. Давайте ради интереса оценим, каков будет поток информации, если телефонный разговор заменить телеграфной передачей того же текста. При среднем темпе речи человек произносит 1...1,5 слова в секунду. Каждое слово состоит в среднем из пяти букв. А для передачи телеграфом одной буквы требуется 5 бит (считаем, что алфавит содержит 32 знака). Перемножив все эти числа, получим скорость передачи телеграфной информации, соответствующей тексту телефонного разговора в реальном масштабе времени, $C \approx 30...40$ бит/с. Это почти в тысячу раз меньше! Вот во что обходятся связистам эмоции и интонации телефонных разговоров. Одна и та же междугородная линия связи может пропустить, скажем, 16 телефонных каналов или несколько тысяч телеграфных! Но подождите, то ли еще будет, когда мы перейдем к телевидению! Там ведь надо передавать еще и движущиеся изображения.

Посмотрим, какой результат мы получили, положив скорость передачи в телефонном канале равной 30 кбит/с, а в телеграфном 30...40 бит/с? Ведь мы предположили, что каждый последующий отсчет сигнала независим от предыдущего и может принимать любые значения. Для телеграфного текста это означает, что вероятность появления любой буквы алфавита одинакова и не зависит от того, какие буквы были переданы ранее. Но при передаче осмысленного текста все совсем не так! Вы смотрите на ленту телеграфного аппарата и читаете: «Добрый ден...». Стоп! Какая буква следующая? Со стопроцентной уверенностью вы скажете, что «ь», и будете совершенно правы. Так сколько бит информации нес этот последний символ «ь». А нисколько. Но на его передачу было затрачено пять двоичных разрядов. Таким образом, мы оценили максимально возможную скорость передачи информации. Она реализуется лишь

2–647

для хаотических, случайных сигналов и беспорядочного набора символов, т.е. для нестандартных текстов.

В реальном тексте можно допустить довольно много пропусков и ошибок, почти не уменьшив количество переданной информации. Возьмите текст стандартной телеграммы: «Поздр–л– с–ем ро–д–ния ж–ла– с–а–тья зд–р–в–я ус–хо–». Из пятидесяти букв пропущено восемнадцать, более трети, и что же? Текст прекрасно восстанавливается. Несколько труднее было бы восстановить текст: «Грузите апельсины бочками», но и это нетрудно, если знать классиков юмористической литературы. А вот текст нестандартной поздравительной телеграммы: «Завидуем только сорок желаем новой весны». Здесь уже труднее выбросить часть букв, и не зря в таких случаях работники телеграфа делают к телеграммах приписку: «Текст верен».

Таким образом, действительное количество информации в сообщении является случайной величиной. Как и для любой случайной величины, можно найти среднее количество информации на символ (букву).

Первую попытку уменьшить количество передаваемой информации, повысив эффективность кодирования, предпринял еще С. Морзе, изобретатель телеграфной азбуки. Вместе с помощниками он изучил немало английской классической литературы, не вникая в смысл прочитанного, а подсчитывая количество различных букв в тексте. В результате была найдена относительная вероятность появления той или иной буквы. Чаще других встречалась буква «e», и ей была присвоена самая короткая кодовая комбинация – одна точка (·). Следующей по частоте появления оказалась «t», и эту букву обозначили одним тире (–). Ну а реже всех появлялись «j» (·–––), «y» (–·––) и «q» (––·–), разумеется, они были обозначены самыми длинными кодовыми комбинациями. Код Морзе – неравномерный, он неудобен для автоматического буквопечатающего телеграфа – телетайпа. В автоматических аппаратах используют равномерный код Бодо, в котором каждому символу – букве отводится пять двоичных знаков – посылок тока. Для автоматического телеграфа особую важность приобретают вопросы оптимального кодирования, которыми, в частности, и занимается наука, о которой я немного расскажу в следующем параграфе.

Телеграфисты, использовавшие код Морзе, не успокоились на достигнутом. При обычном телеграфном обмене передается очень много стандартных слов и фраз. Их стихийно стали сокращать, и в результате появился особый язык общепринятых сокращений. Он особенно был в ходу в 20-е и 30-е годы в связи с развитием телеграфной радиосвязи и используется до сих пор как профессиональными радистами, так и радиолюбителями-коротковолновиками. У них он так и называется – «радиолюбительский код». Вот типичный пример текста при радиосвязи: «Gd dr om Vy gld meet u. Wx hr is stormy. ... Cuagn, ga». Текст получился после общепринятых сокращений слов во фразах «Good day dear old man. Very glad to meet you. Weather here is stormy... Call you again, go ahead». («Добрый день, дорогой приятель. Очень рад связи с тобой. Погода здесь ветреная... Вызову тебя снова, передавай, буду на приеме».) Подобных фраз можно услышать сегодня сколько угодно, выучив телеграфную азбуку и настроив приемник на частоту любительского коротковолнового диапазона. А служебные, ведомственные и государственные радиостанции используют более строгие и официальные Q-код, Z-код и др. Сочетания Q-кода часто используют и радиолюбители. Например, QRP означает «Уменьшите мощность»,

QSL – «Прием подтверждаю», QRU – «Для вас сообщений нет». А кодовое сочетание QST, стоящее в названии известного американского радиолюбительского журнала, означает «Всем постоянным корреспондентам». Ошибочный прием одной лишь буквы полностью изменяет смысл сообщения. Зато коды позволяют намного сократить время передачи сообщений и разгрузить линии связи.

Азбука передачи информации

Наш мир полон информации. Год от года ее становится все больше. Информация есть совокупность сведений о событиях, явлениях, предметах – одним словом, обо всем, что имеется и происходит в мире. Для передачи и хранения информации используют знаки (символы). С их помощью информацию представляют в виде письменного текста, шифрованной цифровой таблицы, в форме живой человеческой речи, графиков, рисунков, электрических сигналов и многими другими способами.

Совокупность знаков, содержащих ту или иную информацию, называют сообщением. Это текст телеграммы, ток микрофона, телевизионное изображение. Сообщения необходимо передавать от человека к человеку, из одного места в другое, ибо без обмена информацией попросту невозможна разумная человеческая жизнь. Информация, заключенная в этой книге, никогда не дошла бы до вас, если бы книга не была издана, а вы ее не прочитали. Собираясь начать какое-либо дело, например конструирование детекторного приемника, вы прежде всего должны ознакомиться с уже имеющейся информацией по этому вопросу. Иначе вам придется самостоятельно повторить научные и экспериментальные труды Ампера, Фарадея, Максвелла, Герца, Попова и многих других ученых и исследователей. Согласитесь, это не самый оптимальный и легкий путь! Гораздо проще прочитать школьный учебник физики, подходящую радиолюбительскую брошюру или, наконец, шестую главу этой книги. Там достаточно информации для построения детекторного приемника.

Нужны ли еще примеры? При строительстве новых заводов, разработке приборов и станков, в путешествиях по ближним и дальним краям просто необходимо использовать информацию, уже накопленную людьми. И чем проще это сделать, тем скорее движется дело. «Позвони и спроси!» – вот как просто и очень часто мы выходим из затруднительных положений. А средства массовой информации – печать, радио, телевидение? Сколько сведений мы узнаем благодаря им! Итак, сегодняшнюю жизнь невозможно представить без широко разветвленных систем передачи информации.

Передача сообщений осуществляется либо с помощью материального носителя (бумаги, магнитной ленты), либо с помощью некоторого физического процесса (посылок тока, звуковых и электромагнитных волн). В этом случае физический процесс, отображающий сообщение, называют сигналом. Сигнал обязательно является функцией времени, т. е. передача знаков происходит последовательно, один за другим. Обратите внимание на то, как вы читаете этот текст: слева направо и сверху вниз, последовательно пробегая взглядом все слова.

Сигналы, представленные в электрической форме, характеризуются определенными параметрами. К ним относится длительность сигнала T_c, определяющая время, нужное для его передачи. Другой параметр – уже введенный нами динамический диапазон – ра-

вен отношению наибольшей мгновенной мощности сигнала $P_{макс}$ к наименьшей мощности, которую необходимо регистрировать при заданном качестве передачи $P_{мин}$ (измеряется он обычно в децибелах):

$$D_с = 10 \lg \frac{P_{макс}}{P_{мин}}.$$

Динамический диапазон спокойной человеческой речи, как уже упоминалось, составляет 30...35 дБ, а симфонического оркестра 70...80 дБ.

Третьим параметром сигнала является ширина его спектра. Звуковой спектр лежит в пределах 16...20000 Гц. Но передавать весь этот спектр необходимо, лишь когда мы желаем обеспечить исключительно высокое качество звуковоспроизведения. При телефонной же связи требуется, чтобы речь была разборчивой и собеседники узнавали друг друга по голосу. В этих условиях достаточна полоса частот от 300 до 3400 Гц, которая и принята в качестве стандартной в телефонной связи.

Ширина спектра обратно пропорциональна скорости изменения сигнала во времени – чем быстрее изменяется сигнал, тем шире спектр. Некоторые буквопечатающие телеграфные аппараты (например, СТ-35) работают со скоростью передачи 50 символов в секунду, или 50 Бод, как говорят связисты. Ширина спектра телеграфного сигнала обычно считается равной $F_с = 1{,}5v$, где v – скорость телеграфирования в бодах. В данном примере ширина спектра составит всего 75 Гц. Как видим, телеграфный сигнал занимает весьма узкую полосу частот. Телевизионный сигнал, напротив, занимает очень широкую полосу частот – около 6 МГц (шесть миллионов герц!).

Произведение трех основных параметров сигнала определяет его объем:

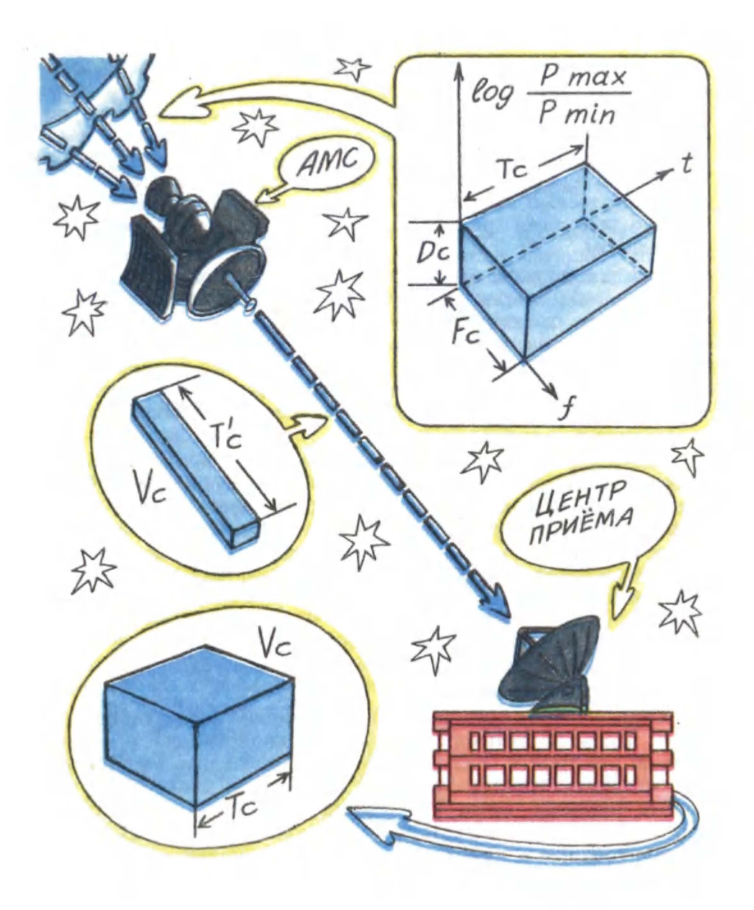
$$V_с = T_с D_с F_с.$$

Объем сигнала можно выразить в битах, если скорость передачи умножить на время передачи сигнала:

$$V_с = C T_с.$$

Чем больше объем сигнала, тем больше информации можно «вложить» в этот объем. Это наглядно иллюстрируется изображением «плитки» информации. Ведь объем параллелепипеда равен произведению его длины, ширины и высоты. Примем длину «плитки» пропорциональной длительности сигнала, ширину – полосе частот, а высоту – логарифму отношения максимальной и минимальной мощностей сигнала. Тогда объем «плитки» окажется равным объему сигнала.

Теперь мы в каждом конкретном случае можем оценить, что и сколько надо передавать. А передача осуществляется средствами радиоэлектроники. Совокупность технических устройств, обеспечивающих передачу сигнала из пункта *А* в пункт *В*, называется каналом связи. Это может быть проводная, кабельная, радиорелейная, оптическая, коротковолновая или спутниковая линия связи с необходимой приемопередающей аппаратурой. Канал связи имеет свои собственные параметры, а они чаще всего не совпадают с параметрами сигнала. Пусть, например, автоматическая межпланетная станция получила телевизионное изображение далекой планеты. Линия радиосвязи со станцией может пропустить лишь ограничен-



Плитку информации при передаче можно деформировать

ную полосу сигнала, и передать весь телевизионный спектр шириной 6 МГц нет никакой возможности. Кроме того, сигнал, прошедший по каналу связи, искажается шумом и помехами. В результате его динамический диапазон оказывается ограниченным сверху максимальной мощностью передатчика, а снизу – уровнем шумов и помех в канале связи.

Другой пример: с автоматической метеостанции, плавающей в открытом море, надо снять информацию, накопленную за сутки или даже за неделю. Сеанс связи может длиться всего несколько минут, ведь корабль, самолет или спутник, как правило, не может долго находиться в зоне действия передатчика станции. Значит, «плитку» информации, подлежащей передаче, надо «деформировать», преобразовать так, чтобы ее объем не изменился, а параметры были согласованы с параметрами канала связи. Так и делают. Телевизионное изображение далекой планеты передают долго, существенно увеличивая T_c, сжав одновременно динамический диапазон сигнала

D_c и его полосу частот F_c. А метеоданные, накопленные сутками, передают за минуты, значительно увеличивая скорость передачи $C = V_c/T_c$, равную произведению динамического диапазона и полосы сигнала: $C = D_cF_c$. Соотношение между динамическим диапазоном и полосой сигнала также выбирают исходя из параметров канала связи. При одной и той же скорости передачи можно сформировать широкополосный сигнал с малым динамическим диапазоном (что обычно выгоднее) либо узкополосный с большим динамическим диапазоном.

Все эти вопросы относятся к очень серьезной, но, к сожалению, малоизвестной широкому кругу читателей науке – теории передачи информации, или теории передачи сообщений. Известны и другие ее названия: общая теория связи, математическая (статистическая) теория связи. Эта наука возникла на стыке математических и технических дисциплин, она связана с кибернетикой, теорией вероятностей, математической статистикой, теорией случайных процессов, статистической радиотехникой.

Большой вклад в разработку математических основ общей теории связи внесли наши советские ученые: академик А. Н. Колмогоров и член-корреспондент АН СССР А. Я. Хинчин. Академик В. А. Котельников создал теорию потенциальной помехоустойчивости, позволяющую рассчитывать предельно достижимые параметры канала связи при наличии шума и помех. Его работы «О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи» (1933 г.) и «Теория потенциальной помехоустойчивости» (1946 г.) стали классическими. Впоследствии В. А. Котельников руководил работами по радиолокации планет Солнечной системы, за что был удостоен Ленинской премии.

Общая теория связи позволяет правильно спроектировать канал связи, выбрать оптимальный способ кодирования и модуляции сигнала, построить (только подумайте: вычислить математически!) оптимальную структурную схему приемника. Давно ушли в прошлое те времена, когда упоминание о линии связи вызывало в воображении образ радиста, вслушивающегося в слабый писк «морзянки», тонущей в шумах эфира, и отстукивающего свои сообщения телеграфным ключом. Хотя такого радиста еще и можно увидеть на далекой зимовке или за любительской радиостанцией, в государственном масштабе проблемы связи решаются по-другому, и обусловлено это неизмеримо возросшими потоками передаваемой информации.

В нашей стране развивается и совершенствуется Единая автоматизированная сеть связи (ЕАСС). Ее основу составляют кабельные и радиорелейные линии связи, причем сеть допускает возможность усовершенствования существующих и подключения новых линий. Оконечная аппаратура сети позволяет передавать не один, а сотни и тысячи телефонных разговоров одновременно. Как же это делается? Раньше поступали просто: надо организовать два телефонных канала – протягивали две линии. В старых фильмах можно увидеть, а может быть, некоторые из читателей видели и в действительности пучки из нескольких десятков проводов, протянутых на телеграфных столбах с перекладинами. Сейчас такого уж не встретишь, и это очень хорошо с точки зрения экономии материалов и труда связистов. Для того чтобы передать много каналов по одной линии, которая так и называется – многоканальная линия связи, информацию уплотняют. Различают два основных вида уплотнения: частотное и временно́е.

При частотном уплотнении лишь один телефонный канал передается по линии связи в его «собственной» полосе частот 300...3400 Гц. Сигналы других каналов преобразуются по частоте и занимают другие, более высокочастотные участки спектра. В приемной аппаратуре производят обратное преобразование и получают исходный звуковой спектр для каждого канала. Для разделения каналов при частотном уплотнении используют электрические частотные фильтры.

При временно́м уплотнении линия связи «предоставляется» каждому каналу на очень короткое время и сигналы каналов передаются по очереди в виде коротких импульсов. Частота переключения (коммутации) каналов в соответствии с теоремой отсчетов должна быть вдвое выше наивысшей частоты спектра сигнала. Для телефонных каналов она может составлять, например, 8 кГц.

В многоканальной линии связи общая полоса передаваемых частот значительно возрастает. Например, в современной отечественной системе К1800 может быть передано 3600 телефонных каналов при общей полосе частот, занимаемой групповым сигналом, 8,5 МГц. Разработаны и еще более емкие системы, например К10800, пропускающая 21 600 телефонных каналов при общей полосе частот 61 МГц. При ее создании использовались самые новые радиоэлектронные компоненты и конструкторско-технологические решения.

Пропустить столь широкие полосы частот в радиоканалах длинных, средних и коротких волн невозможно, поэтому для передачи группового сигнала по радио приходится использовать сверхвысокие частоты – дециметровые и сантиметровые волны. А поскольку эти волны распространяются лишь в пределах прямой видимости между антеннами, строят радиорелейные линии – ряд мачт с антеннами и ретрансляторами, размещаемыми на расстоянии 30...60 км друг от друга. Не правда ли, радиорелейная линия чем-то напоминает древнюю систему сигнальных башен! Спираль развития средств связи совершила виток, но насколько же связь усовершенствовалась и качественно, и количественно! Типовая радиорелейная линия может передавать несколько телевизионных и сотни, тысячи телефонных каналов, в сумме – сотни мегабит информации в секунду.

А с наступлением космической эры развиваются и совершенствуются спутниковые системы связи, для которых уже не существует больших расстояний на поверхности Земли. Как же изменился телеграф в современных условиях? Теперь его даже трудно назвать телеграфом, в ходу новое название – цифровые системы передачи сообщений. Их интенсивное развитие связано с успехами общей теории связи, освоением новых диапазонов частот (СВЧ, оптического), совершенствованием вычислительной техники, успехами в освоении космоса. Цифровые системы связи проектируются и разрабатываются на основе последних достижений микроэлектроники. Первоначально ряд телеграфных каналов объединяется в группу, размещаемую в полосе частот стандартного телефонного канала. Скорость передачи в первичной группе составляет от 200 до 9600 бит/с. Групповые сигналы объединяются в более «мощные» стволы со скоростью передачи до 10 Мбит/с. А на магистральных линиях связи скорость передачи достигает 140 Мбит/с. Для формирования сигналов цифровых систем связи применяют весьма сложную аппаратуру, например ИКМ-1920, использующую импульсно-кодовую модуляцию и специальные помехоустойчивые виды кодирования. Все чаще по цифровым каналам связи передается и аналоговая информация

(телефонные переговоры, радиовещательные программы), преобразованная в цифровую форму.

В сложных и разветвленных сетях связи, пропускающих огромное количество цифровой информации, надо обеспечить управление, контроль правильности передачи, коммутацию каналов, выравнивание скоростей передачи, контроль исправности линий, да мало ли что еще надо для их обслуживания! И как везде, где сложную и трудоемкую работу надо выполнять быстро и безошибочно, на помощь человеку приходит электронно-вычислительная машина (ЭВМ). Да, да, сетями связи теперь может управлять ЭВМ. Она и переключит каналы, и накопит переданную информацию, и сделает многое-многое другое.

Итак, мы стоим перед лицом новой современной индустрии. Она не занимается ни выплавкой металла, ни изготовлением продукции, ни добычей полезных ископаемых, не вырабатывает в промышленных количествах энергию и не передает ее на огромные расстояния через целые области, регионы и страны. Эта индустрия занимается вопросами получения, хранения, обработки и передачи информации. Без нее невозможно правильное, экономное и эффективное функционирование других – добывающих, производящих и обрабатывающих отраслей индустрии, ибо она помогает людям думать и решать сложные проблемы, обеспечивает обмен и накопление знаний, опыта.

Практически вся индустрия информации строится на базе достижений радиоэлектроники. Вот почему значение последней так велико и, как представляется, будет расти дальше.

Но чтобы познакомиться с этой интереснейшей и всеобъемлющей, вездесущей и удивительной наукой – радиоэлектроникой, – вам придется прочесть следующие главы.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

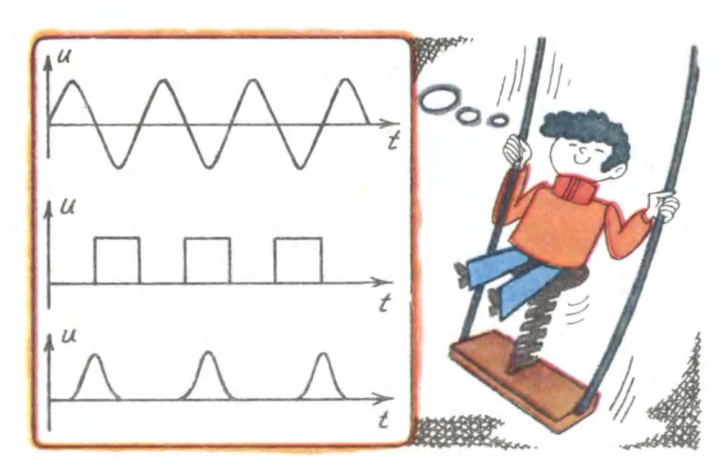
Вопреки названию в этой главе вас ожидает рассказ о «несущих» колебаниях, о маятниках старинных часов, разноцветных солнечных зайчиках и радуге, ксилофонах и кварцевых кристаллах, взаимовыручке друзей и отравляющем жизнь гвозде в ботинке, морской болезни, грузике на веревочке, а также о том, как часто простое устройство позволяет сделать очень важные выводы.

Регулярные сигналы

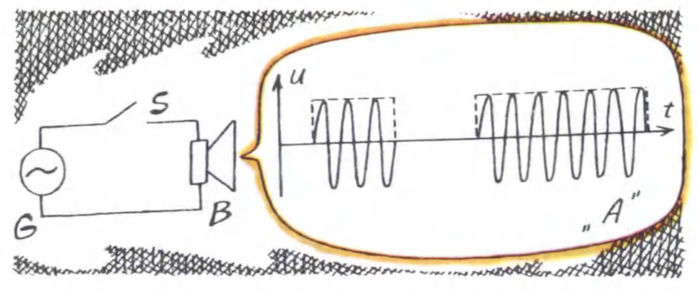
Давайте придумаем сигнал, не несущий никакой информации. Электрический сигнал, конечно. Вот два провода, источник тока и ключ. Если ключ не нажимать, то нет и сигнала, а значит и никакой информации. Другой случай: ключ нажат постоянно. Между проводниками линии действует напряжение источника. Оно не изменяется, следовательно, и информации никакой не передается. Снятие напряжения размыканием ключа – уже сигнал, смена состояний от «1» к «0». Этот случай не подходит. Значит, либо не изменяющееся состояние «0» (напряжения в линии нет), либо не

изменяющееся состояние «1» (напряжение есть) информации не несут. Рассмотренные два случая тривиальны. Есть еще случай, когда напряжение в линии изменяется, а информации все равно не передается. Не догадываетесь пока? Напряжение должно изменяться периодически, по наперед заданному закону. Тогда наблюдатель на конце линии, противоположном источнику, сможет заранее предсказать все изменения сигнала. Информация о сигнале у него уже есть, и сам сигнал не приносит ему никакой новой информации. Таким образом, чтобы сигнал переносил информацию, в нем должен быть элемент случайности, неопределенности для получателя. Регулярные, полностью определенные и наперед заданные сигналы информации не несут.

На рисунке показаны примеры таких регулярных периодических сигналов. Первый сигнал – синусоидальный. Говоря другими словами, изменения напряжения подчиняются синусоидальному закону. Другой сигнал – тоже периодический, но прямоугольной формы. Он описывается так называемой функцией Уолша, принимающей только два значения: либо 0 и 1, либо −1 и +1. Третий пример – последовательность импульсов одинаковой формы, следующих через равные промежутки времени. Описанные сигналы могут быть переносчиками информации только в том случае, если их параметры изменяются в соответствии с передаваемым сигналом. Например, если в соответствии со знаками телеграфной азбуки включается и выключается переменное синусоидальное напряжение. Кстати, именно так устроены и любой тренажер для изучения телеграфной азбуки на слух, и детская игра «телеграф». Вот их упрощенная схема. Колебания от генератора звуковой частоты через ключ подведены к громкоговорителю. Нажат ключ – слышен писк, не нажат – молчание. Из рисунка видно, как выглядит на графике передаваемая буква «А» (· –). Здесь уже не просто посылки тока, а посылки, заполненные синусоидальными колебаниями некоторой частоты. Они называются несущими колебаниями. В данном случае несущая манипулирована телеграфными посылками. Переход от простой передачи на постоянном токе к передаче на несущей дает много преимуществ.



Примеры периодических сигналов

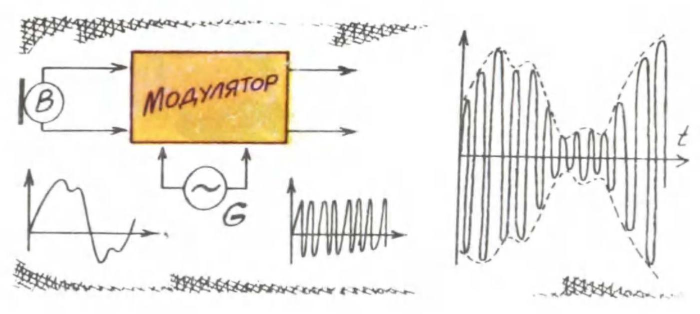


Передача телеграфных посылок с помощью несущего колебания

Например, становится возможной многоканальная передача многих телеграфных и телефонных сообщений одновременно по одной и той же линии. В этом случае для разных сообщений используются несущие колебания с различными частотами. На приемной стороне они разделяются набором фильтров, настроенных на несущие частоты. На выходе каждого фильтра получается уже только один сигнал. Такой способ многоканальной передачи, как мы уже говорили, называют частотным уплотнением.

Несущую можно не только манипулировать дискретным сигналом, но и модулировать аналоговым сигналом. Модулировать – значит плавно изменять один из параметрв несущей, например амплитуду. Вот, например, как осуществляется телефонная передача на несущей. К специальному устройству, модулятору, подводят звуковые колебания от микрофона и незатухающие колебания несущей частоты от генератора *G*. В модуляторе амплитуда несущей изменяется в соответствии со звуковым напряжением. На выходе устройства под действием модулятора получается амплитудно-модулированный (АМ) сигнал. Сама по себе несущая информации не несет, но АМ сигнал несет уже полную информацию о звуковых колебаниях, поступающих от микрофона.

Передача сигналов на несущей частоте используется очень широко. Обычная телеграфная передача (посылки постоянного тока) происходит со скоростью не более 200 Бод. Такой телеграфный сигнал занимает полосу частот от нуля до примерно 300 Гц. Речевой



Модуляция несущего колебания

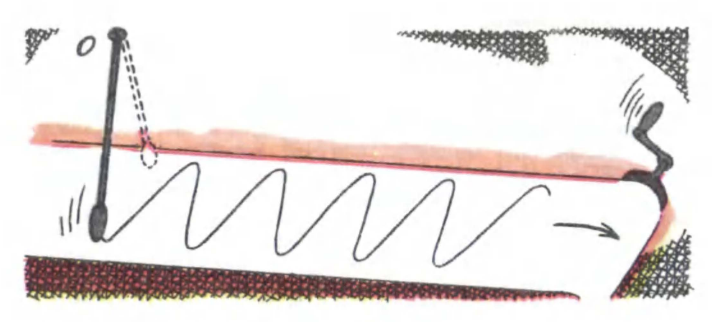
телефонный сигнал занимает полосу частот 300...3400 Гц, а высококачественный музыкальный сигнал – от 20 до 16000 Гц. Такие сигналы, разумеется, нельзя непосредственно излучать в эфир, поскольку названные частоты соответствуют очень длинным волнам. Другое дело, когда передача ведется на несущей частоте, скажем, 3 МГц (мегагерц – это миллион, или 10^6 колебаний в секунду). Частота 3 МГц соответствует длине волны 100 м. Этот сигнал уже легко излучить в эфир, осуществив таким образом радиопередачу. Каждой радиостанции присваивается своя собственная несущая частота. Настраивая радиоприемник, полезно знать, что Киев следует искать на частоте 783 кГц, а Ленинград – на частоте 801 кГц.

Самые распространенные несущие колебания – синусоидальные. Давайте их и рассмотрим подробнее.

Синусоидальные колебания

Часы с маятником изобрел великий оптик и механик Христиан Гюйгенс в 1657 году. Любопытно отметить, что в Голландии того времени уже существовала патентная служба, и патент на изобретение маятниковых часов был выдан Гюйгенсу 16 июня 1657 года. Создание часов не было для изобретателя самоцелью. Гюйгенс считал, что при проведении астрономических наблюдений (кроме часов он занимался и оптическими инструментами, и астрономией, и теорией светового излучения) совершенно необходим точный отсчет времени. Современная наука полностью подтвердила правильность этого мнения. Правда, при современных астрономических наблюдениях используют гораздо более точные часы – атомные стандарты частоты, имеющие стабильность (точность хода) примерно 10^{-15}. Это значит, что атомные часы уходят вперед или отстают на одну секунду более чем за тридцать миллионов лет!

Если к качающемуся маятнику приделать кисточку или перышко, а под маятником равномерно протягивать бумажную ленту, то кривая, которую вычертит перышко, будет синусоидальной. Следовательно, колебания маятника происходят по синусоидальному закону. Теперь представим, что мы смотрим в очень сильный телескоп на далекую планету, обращающуюся по круговой орбите вокруг своей звезды – «солнца». Если смотреть с направления, перпендикулярного плоскости орбиты (по стрелке *A*), то мы увидим, что планета движется по окружности. А если смотреть в плоскости орбиты, по стрелке *B*? Мы увидим, как планета пересекает диск «солнца», отходит на максимальное расстояние в одну сторону, затем возвращается, опять пересекает диск «солнца» и удаляется на такое же расстояние в другую сторону. Нам покажется, что планета совершает колебания около точки равновесия, совпадающей с центром ее «солнца». Эти колебания синусоидальны. Зачем ходить за примерами в космос – возьмите шарик на ниточке и заставьте его совершать круговые движения. Если посмотреть на шарик сбоку, по направлению оси x, мы увидим синусоидальные колебания шарика. Если же посмотреть с другой стороны, в направлении оси y, мы опять увидим синусоидальные колебания, но происходящие со сдвигом на четверть оборота по отношению к первым. У нас получился маятник, качающийся одновременно в двух перпендикулярных направлениях (по осям x и y). Колебания одинаковы, но запаздывают друг относительно друга на четверть периода (оборота). Такое запаздывание соответствует сдвигу колебаний по фазе на $\pi/2$ [если



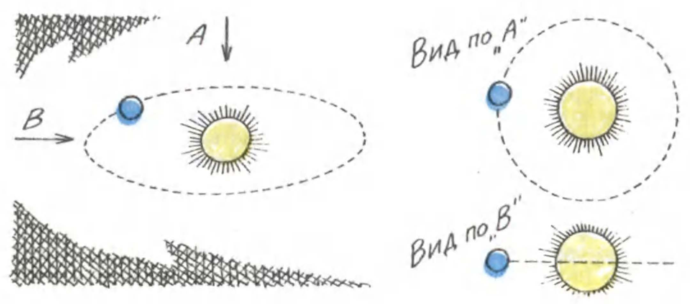
Запись колебаний маятника на бумажной ленте

полный период (оборот) соответствует углу 2π, то четверть оборота – $\pi/2$]. Получается, что движение по окружности – пример сложного колебательного движения, состоящего из двух простых, синусоидальных. Теперь ясно, что синусоида – это развернутая во времени проекция равномерно вращающейся точки на какое-либо фиксированное направление. Поясним примером и графиком. Пусть вектор $\bar{A}$ вращается вокруг начала координат, угол поворота обозначим Φ. Тогда проекция вектора $\bar{A}$ на вертикальную ось будет $y = A \sin \Phi$. Если еще учесть, что при равномерном вращении угол Φ нарастает прямо пропорционально времени: $\Phi = \omega t$, где ω – угловая скорость вращения, то получится широко известная формула

$$y = A \sin \omega t,$$

описывающая простое, синусоидальное колебательное движение.

Точно такой же формулой описывается и переменное электрическое напряжение, имеющееся, например, в электрической розетке. Мне кажется, теперь вы легко сможете ответить на вопрос, почему переменное напряжение в электросети синусоидально. Ведь якорь генератора на электростанции вращается равномерно. А магнитное поле, нужное для генерирования тока, направлено перпендикулярно оси якоря. Оно задает ту самую ось, на которую проектируется вращение якоря. Впрочем, гораздо лучше устройство генератора описано в школьном учебнике физики. Итак, в нашей электрической



Проекция кругового движения



Синусоида – проекция равномерно вращающейся точки

розетке имеется напряжение

$u = A \sin \omega t$.

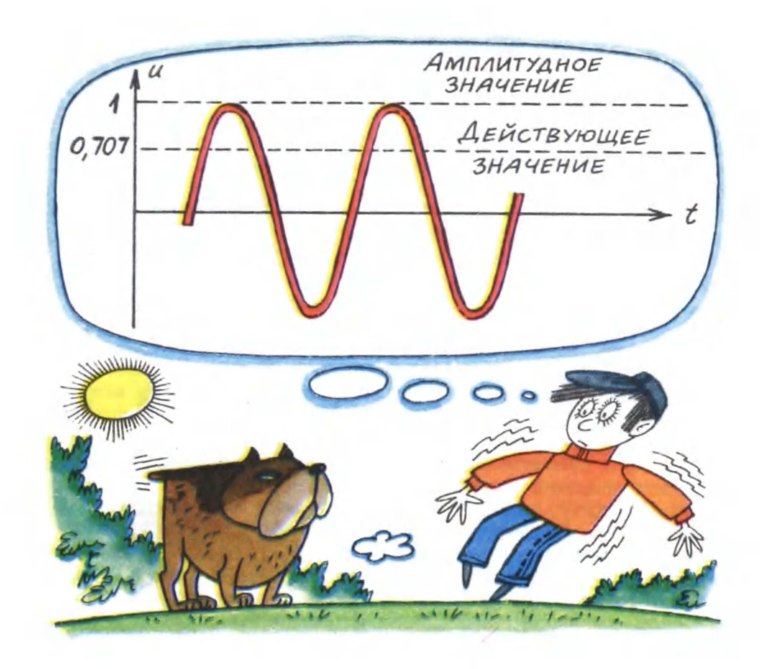
Названия параметров, входящих в формулу, стали несколько другими: А – амплитуда напряжения, ω – угловая частота, t – это по-прежнему текущее время. Если известно, что сетевое напряжение 220 В, это не значит, что $A = 220$ В. В электротехнике, если нет специальной оговорки, пользуются действующими значениями напряжения или тока. Действующие значения соответствуют значениям постоянного тока, развивающего ту же мощность. Амплитудное значение напряжения или тока в $\sqrt{2}$ раз больше действующего. Поэтому при действующем напряжении в сети 220 В мгновенное напряжение изменяется от нуля до 311 В по закону синуса и $A = 311$ В.

Давайте обсудим, почему синусоидальная форма напряжения или тока является простейшей, в некотором смысле наилучшей формой. Как мы уже установили такую форму тока дает равномерно вращающийся якорь генератора. Но если какими-либо техническими ухищрениями сделать форму тока другой, например прямоугольной? Даст ли это какие-нибудь преимущества при передаче электроэнергии? Оказывается, нет!

Спектры

Прямоугольную волну тока можно представить как сумму простейших синусоидальных волн. На рисунке показано, как это делается. Сверху изображено синусоидальное колебание с частотой f_0. Напомним, что угловая частота связана с обычной, циклической частотой простым соотношением $\omega = 2\pi f$. Частота тока электрических сетей в СССР выбрана равной 50 Гц, в США – 60 Гц. Это соответствует частоте вращения якоря генератора 3000 и 3600 об/мин соответственно. Если к изображенному на рисунке основному колебанию с частотой f_0 добавить еще одно колебание с частотой $3f_0$ (третью гармонику основного колебания), то форма суммарного колебания изменится. Добавим еще и пятую гармонику – колебание с частотой $5f_0$. Относительные амплитуды гармоник должны уменьшаться обратно пропорционально частоте. Результат суммирования трех колебаний с частотами f_0, $3f_0$ и $5f_0$ и с амплитудами 1, 1/3 и 1/5 изображен на нижнем графике. Здесь мы видим поразительное приближение к прямоугольному колебанию.

Великий французский математик Ж. Фурье доказал, что любое периодическое колебание можно представить суммой простейших, синусоидальных колебаний с кратными частотами. Их набор называется спектром исходного колебания. Спектр можно изобразить графически, отложив по горизонтали частоты, а по вертикали относительные амплитуды гармоник. Точное приближение к исходной форме колебания дает чаще всего лишь бесконечный ряд гармоник. Например, для точного воссоздания симметричного прямоугольного колебания нужен бесконечный ряд нечетных гармоник основной частоты. Разумеется, передать такой сложный спектр по проводам электрической сети намного труднее, чем одну-единственную спектральную гармонику синусоидального колебания. Высшие гармоники неизбежно будут ослабляться по амплитуде, да и фаза их изменится, что приведет к искажению передаваемого прямоугольного колебания. Только синусоидальное колебание меньше всего подвержено искажениям при передаче.

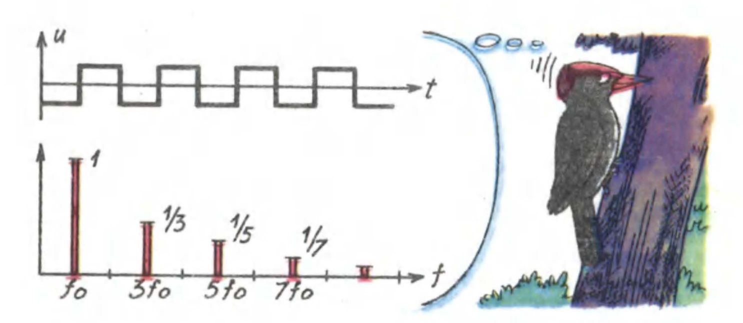


Синусоидальные колебания

Чем реже происходят колебания, тем больше их период (т. е. время совершения одного полного колебания) и тем ниже основная частота спектра этих колебаний. Спектральные линии на оси частот при этом располагаются гуще. Непериодический процесс тоже можно представить спектром, но спектр окажется уже не состоящим из отдельных спектральных линий, а сплошным. Соответствующая математическая операция называется интегральным преобразованием Фурье. Оно используется главным образом для импульсных сигналов. Характерна следующая закономерность: чем короче импульс, тем шире его спектр. Наивысшая частота спектра приблизительно обратно пропорциональна длительности импульса. Например, импульс длительностью 0,01 с имеет ширину спектра около 100 Гц, а импульс длительностью 1 мкс (10^{-6} с) – 1 МГц. Особый интерес представляют бесконечно короткие или, как их еще называют, дельта-импульсы (δ-импульсы). Они обладают бесконечно протяженным равномерным спектром (см. рисунок).

Звук падения одной капли дождя – это слабый и очень короткий щелчок. Он содержит колебания всех возможных звуковых частот – от самых низких до самых высоких. Шум дождя вы, разумеется, слышали и прекрасно себе представляете. Он складывается из отдельных звуков падения множества капель. Спектр шума дождя равномерен – его интенсивность одинакова на всех звуковых частотах. В электронике есть отличный аналог шума дождя – дробовой шум радиоламп и полупроводниковых приборов. Пролет каждого элементарного носителя электрического заряда, электрона или иона, создает в цепи короткий импульс тока. А сумма множества таких

Прямоугольное колебание можно представить суммой синусоидальных гармоник с амплитудами $A_n = A_1/n$ *(где* $n = 1, 3, 5...$*)*



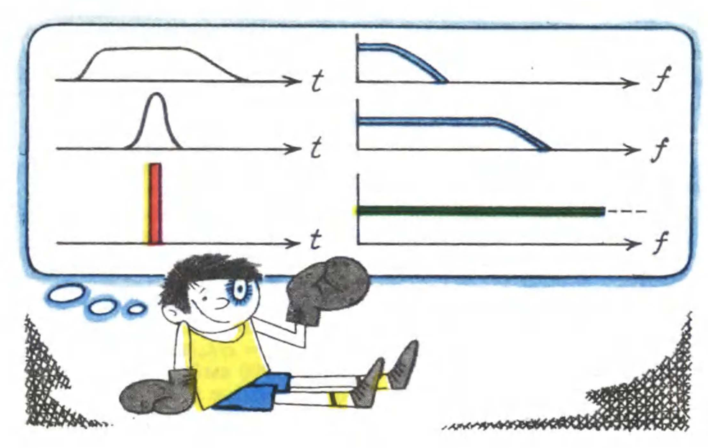
Прямоугольное колебание и его спектр

импульсов образует электрический дробовой шум, очень похожий на шум дождя, если его воспроизвести через громкоговоритель. Собственно, само название «дробовой шум» произошло от звука дроби, ссыпаемой в какой-либо сосуд.

Не напомнило ли вам что-нибудь это очень знакомое слово «спектр»? Спектр солнечного света, спектр радуги, спектр, полученный на экране с помощью стеклянной призмы... Что здесь общего со спектром электрических колебаний? Очень много. Разложение колебаний в спектр есть разложение на элементарные, синусоидальные колебания. Свет – это электромагнитная волна, распространяющееся электромагнитное колебание. А белый свет – это сумма бесконечного множества колебаний с различными частотами. Вот почему радисты называют шум с равномерным спектром белым.

Частоты световых колебаний можно найти, воспользовавшись связью между частотой и длиной волны: $f = c/\lambda$, где c – скорость света в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с, или 300 000 км/с. Известно, что человеческий глаз реагирует на электромагнитные волны с длинами от 0,7 мкм (красный свет) до 0,4 мкм (синий свет). Частоты границ видимого диапазона составляют соответственно $4 \cdot 10^{14}$ и $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц, т. е. 400 000 и 750 000 ГГц. Обратите внимание, насколько это больше частоты тока в электрической сети (50 Гц)! Оптики ввели понятие «монохроматическое колебание». Моно – значит единственный, хромос – цвет. Монохроматическое колебание имеет только одну, строго определенную частоту. Монохроматическая волна оптического диапазона воспринимается как густой, насыщенный цвет. Если вы когда-нибудь видели свет гелиево-неонового лазера (тонкий красный луч), обратили ли вы внимание на полную насыщенность цвета? Длина волны He – Ne-лазера составляет 0,63 мкм, и его свет воспринимается как красный или красно-оранжевый. Других длин волн в излучении этого лазера нет. Если же электромагнитная волна имеет другую длину, она и воспринимается человеческим глазом как излучение другого цвета. Зеленый цвет соответствует длинам волн около 0,5 мкм, синий – 0,4 мкм.

Мы узнали, что спектр синусоидального колебания самый простой: он состоит всего из одной спектральной линии на «своей» частоте f_0. Вот почему несущие колебания радиовещательных станций строго синусоидальны. Нельзя же допустить, чтобы одна и та же станция принималась одновременно на нескольких частотах! После такого заключения некоторые из наиболее любознательных читателей могут прийти к полному недоумению: при передаче сигналов по радио надо применять синусоидальное несущее колебание, которое никакой информации не несет! Но информация-то все-таки передается! Никакого противоречия здесь, разумеется, нет. Прежде всего надо заметить, что исходный сигнал, несущий информацию (телеграфный, речевой или музыкальный), занимает некоторый спектр частот. Мы уже говорили о его ширине, а теперь изобразим сигнал и спектр графически. Обратите внимание, что спектр теперь уже не линейчатый, а сплошной. Линейчатым спектром обладают только периодические процессы, регулярно повторяющиеся во времени. А передача информации – процесс случайный, вероятностный. В зависимости от текста телеграммы могут передаваться различные сочетания точек и тире. И им будут соответствовать различные спектры. Но общей для них будет занимаемая полоса частот, указанная на графиках. Ширина ее обозначена буквой *B*. Наложим передаваемый сигнал на синусоидальную несущую. Излучаемый в эфир или передаваемый по линии модулированный сигнал уже не будет чисто синусоидальным: его амплитуда будет изменяться в такт с переда-



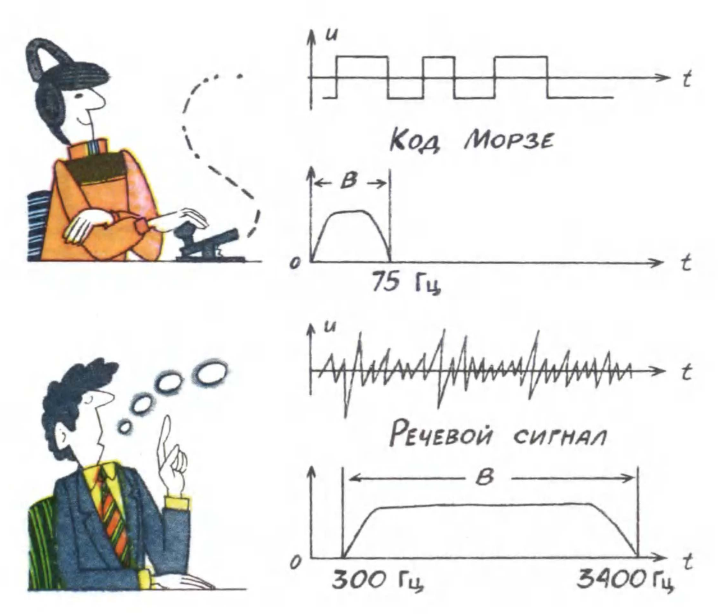
Импульсы и их спектры

ваемым сообщением. Спектр излучаемого сигнала станет таким, как показано на рисунке. Кроме спектральной линии на частоте f_0 – несущей – появятся боковые полосы. Это два зеркально-симметричных спектра по обе стороны от несущей. Форма их при амплитудной модуляции точно повторяет форму спектра исходного сигнала.

Образование двух боковых полос в спектре АМ колебания можно пояснить математически. Только удобнее вместо синусов взять четные функции – косинусы (выражения при этом получаются проще и понятнее). А форма косинусоидального колебания точно такая же, как и синусоидального. Пусть несущая $A \cos \omega t$ промодулирована по амплитуде низкочастотным косинусоидальным колеба-



Спектр белого света



Сигналы и их спектры

нием с угловой частотой Ω. Вид получившегося сигнала показан на рисунке. Его максимальная амплитуда равна $(1 + m)A$, а минимальная – $(1 - m)A$. Параметр m называется коэффициентом модуляции. При АМ он не может быть больше единицы, поскольку уже при $m = 1$ минимальная амплитуда сигнала падает до нуля. Запишем выражение для АМ сигнала:

$$u = A(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega t,$$

где A – амплитуда несущей; ω – угловая частота несущей; Ω – угловая частота модулирующего колебания.

Это выражение легко преобразовать с помощью известного тригонометрического тождества

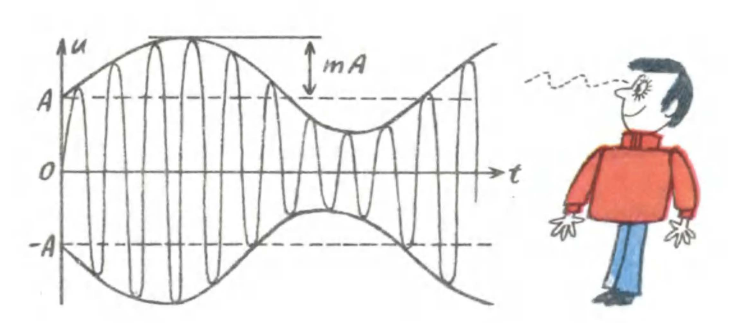
$$\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)].$$

Раскрывая скобки и используя это тождество, получаем

$$u = A\cos\omega t + \frac{mA}{2}\cos(\omega - \Omega)t + \frac{mA}{2}\cos(\omega + \Omega)t.$$

Из этого выражения видно, что напряжение сигнала является суммой трех синусоидальных колебаний: несущей (первое слагаемое), нижней боковой частоты (второе слагаемое) и верхней боковой частоты (третье слагаемое). Эти три колебания и составляют спектр сигнала при АМ синусоидальным сигналом. Если же в модулирующем сигнале содержится несколько низкочастотных ко-

Спектр сигнала при АМ



Форма сигнала при АМ синусоидальным колебанием

лебаний, то каждое из них даст пару спектральных линий в спектре модулированного высокочастотного сигнала. Каждая пара спектральных линий симметрична относительно несущей.

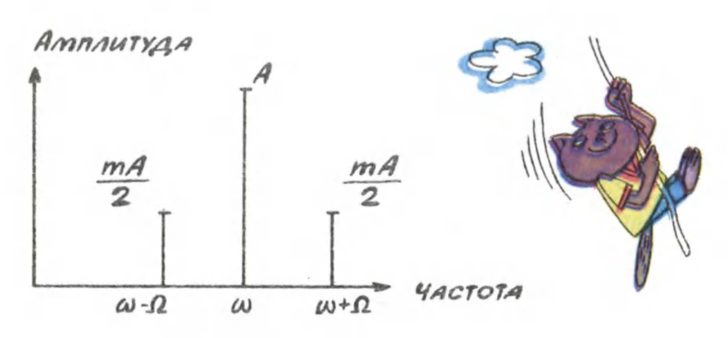
В 20-х годах нашего столетия, когда начинались экспериментальные радиотелефонные передачи немногими построенными к тому времени радиостанциями, в научных журналах разгорелся спор, существуют ли боковые полосы сигнала на самом деле, или это только удобная для расчетов математическая функция? Хороших фильтров, позволяющих выделить из передаваемого спектра одну несущую или одну боковую полосу тогда еще не было. Сейчас такие фильтры используют в каждом профессиональном связном передатчике и приемнике. При радиосвязи на коротких волнах уже никто не излучает весь спектр сигнала. С помощью фильтров «вырезается» и затем излучается в эфир только одна боковая полоса сигнала. Несущая не излучается, поскольку никакой информации она не несет, а вторая боковая полоса зеркально (по спектру) отображает первую, следовательно, передавать ее тоже не обязательно.

Переход на передачу только одной боковой полосы в радиосвязи привел к подлинной революции: эффективность радиопередатчиков повысилась в 8...16 раз (что эквивалентно такому же увеличению их мощности), и это без дополнительных энергетических затрат. В то же время занимаемая передатчиком полоса частот сократилась вдвое, что позволило вдвое увеличить число радиостанций, работающих одновременно на различных частотах в выделенном частотном диапазоне и не создающих взаимных помех. Попробуйте после этого сказать, что боковые полосы сигнала всего лишь математическая функция!

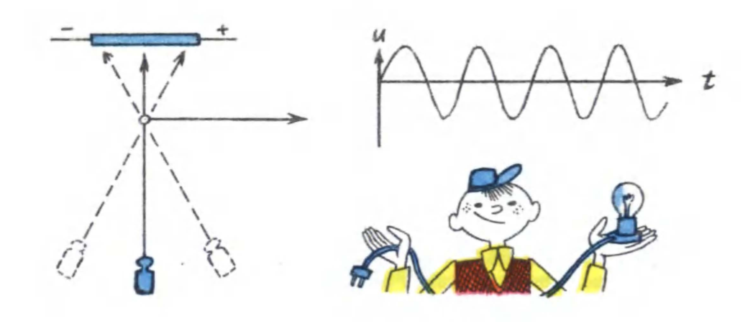
К сожалению, перейти на излучение одной боковой полосы в радиовещании пока не удается из-за наличия громадного парка приемников у радиослушателей, не приспособленных для обработки сигнала с одной боковой полосой. Но об этом мы поговорим подробнее в главе, специально посвященной радиовещанию.

Колебательный контур

Не пора ли нам с вами немного поговорить и о том, как создаются электрические колебания. Вообще-то ничего нет проще! Раз маятник колеблется по синусоидальному закону, то не так уж сложно преобразовать его механические колебания в электрические.



Спектр сигнала при АМ синусоидальным колебанием



Преобразователь колебаний маятника в электрический сигнал

И устройство, вполне пригодное для этой цели, нам уже встречалось. Вспомните простейший датчик углового положения фюзеляжа самолета. Если жесткий отвес с грузом на конце заставить колебаться подобно маятнику, то с движка потенциометра можно будет снять синусоидальный электрический сигнал. Есть только два существенных «но», из-за которых подобные устройства не нашли практического применения.

Первое «но» – частота генерируемых колебаний оказывается слишком низкой. Сколько раз в секунду может качнуться маятник? Два, три, от силы десять, если маятник достаточно короткий. А нужны гораздо бо́льшие частоты. И второе «но» – однажды запущенный маятник покачается-покачается да и остановится. Колебания с постоянно уменьшающейся до нуля амплитудой называются затухающими. Обычно же требуются колебания с неизменной амплитудой, то есть незатухающие. Нельзя же, например, допустить, чтобы громкость приема радиостанции постепенно уменьшалась и сходила на нет! Следовательно, необходимо устройство, подталкивающее наш маятник в такт его собственным колебаниям. Такое устройство есть в любых часах. Масса гирь или сила пружины через анкерное колесо периодически подталкивают маятник, и часы не останавливаются. Воистину это гениальное изобретение – часы – является механическим аналогом электронного генератора незатухающих колебаний.

Чтобы повысить частоту, надо уменьшить размеры маятника. При этом удобнее использовать для возвращения маятника в исходное положение после каждого колебания не силу тяжести, а силу упругости. Так устроен пружинный маятник. Его частота повышается с увеличением упругости подвеса и уменьшением массы груза. Тогда можно и совсем отказаться от пружины – пусть работает упругость самого материала грузика! Образец такого маятника – упругий стерженек или пластинка, колеблющаяся по толщине. Остается открытым вопрос, как заставить пластинку колебаться. Можно ударом. Но колебания будут затухающими. Играли когда-нибудь на ксилофоне? Если даже и не играли, то представляете себе устройство этого музыкального инструмента. Удар молоточка по пластине вызывает звук, а высота тона соответствует частоте колебаний пластинки. Обратите внимание: чем меньше пластинка, тем выше частота создаваемых ею колебаний, тем выше и тон звучания. А частота колебаний упругой пластинки при размерах ее менее санти-



Пружинный маятник и колебания стержня по толщине

метра будет лежать в неслышимом ультразвуковом диапазоне и может достигать десятков миллионов колебаний в секунду (десятков мегагерц). Как же построить анкерное колесо, пригодное для столь высоких частот? К счастью, природа сама позаботилась о том, чтобы изобретатели не выдумывали подобных «микроколес».

Некоторые кристаллические вещества, в том числе кварц, сегнетова соль и ряд искусственных керамик, обладают пьезоэлектрическим эффектом. Если кристалл сжать, на его поверхности появятся электрические заряды. Растянуть – снова появятся заряды, но уже противоположного знака. Как это объяснить физически? Да очень просто, на житейском примере. Из подошвы вашего ботинка выступает гвоздь, и ходить стало больно – при каждом шаге гвоздь колется. Вы вооружаетесь молотком и плоскогубцами, снимаете ботинок и... никакого гвоздя не обнаруживаете. Надели ботинок снова, наступили – колет! Причина очевидна: гвоздь выступает только под тяжестью ноги, сжимающей подошву, которая при этом деформируется, уменьшается по толщине. Пьезокристалл содержит решетку положительных ионов и такую же решетку отрицательных ионов, как бы вложенную в первую. При деформации кристалла положительные ионы выступают наружу, подобно гвоздям из подошвы, создавая на этой поверхности положительный заряд. А на противоположной поверхности выступают отрицательные ионы, создавая такой же заряд противоположного знака. Изменился знак деформации (сжали, вместо того чтобы растягивать) – изменился и знак зарядов на поверхностях кристалла.

При колебаниях пьезоэлемента (так называют пьезоэлектрическую пластинку, вырезанную из кристалла) на поверхности пластинки появляется переменный заряд, изменяющийся по синусоидальному закону с частотой ее колебаний. Заряд можно снять, усилить специальным усилителем электрических колебаний и снова подвести к пластинке. Вступит в действие обратный пьезоэффект – при сообщении пластинке заряда она деформируется. Таким образом, в пластинке пьезоэлектрика можно поддерживать незатухающие колебания.

Особо высокой стабильностью к изменениям температуры и других параметров окружающей среды обладают кварцевые пьезоэлементы – резонаторы. Поэтому генераторы с кварцевыми резонаторами широко используют для получения незатухающих колебаний высокой частоты. Видели кварцевые часы? Может быть, такие часы у вас уже есть? Их сердце – кварцевый генератор. Его высокочастотные

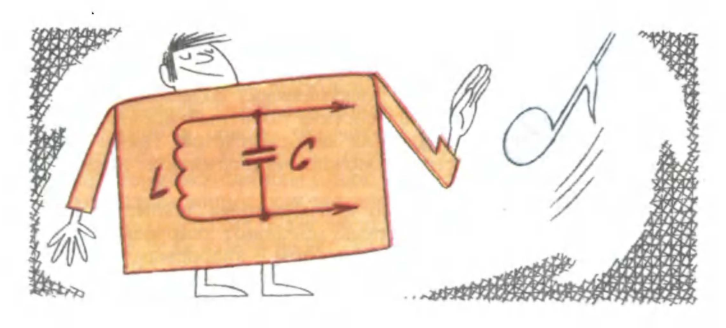


Колебания пьезокристалла

колебания с помощью интегральных микросхем делят по частоте, получая таким образом секундные, минутные, часовые и другие импульсы. Они, в свою очередь, управляют ходом стрелки или показаниями цифрового индикатора. Нестабильность кварцевых часов, т.е. точность их хода, составляет около $3 \cdot 10^{-6}$. Это значит, что кварцевые часы «уходят» менее чем на одну секунду за несколько дней. Вот так еще раз, уже в наши дни, подтвердилась прозорливость Христиана Гюйгенса, выбравшего эталоном времени период колебаний маятника!

Пьезокварцевый генератор есть на любой радиовещательной станции. Его называют задающим, поскольку он определяет частоту излучаемого станцией сигнала. Стабильность радиочастотных кварцевых генераторов составляет $10^{-6} \ldots 10^{-7}$, а при термостабилизации кварца и особо тщательном проектировании всего задающего генератора может достигать 10^{-12}. Кварцевые генераторы имеют много достоинств, но в то же время и один существенный недостаток – их нельзя перестраивать по частоте. На заре радиотехники пьезокварцевые резонаторы не использовались, да и соответствующей технологии производства их не было. Резонатором, т.е. устройством, совершающим колебания вполне определенной частоты, служил колебательный контур. Он и теперь очень широко применяется в любых радиотехнических устройствах: передатчиках, приемниках, резонансных усилителях и многих-многих других.

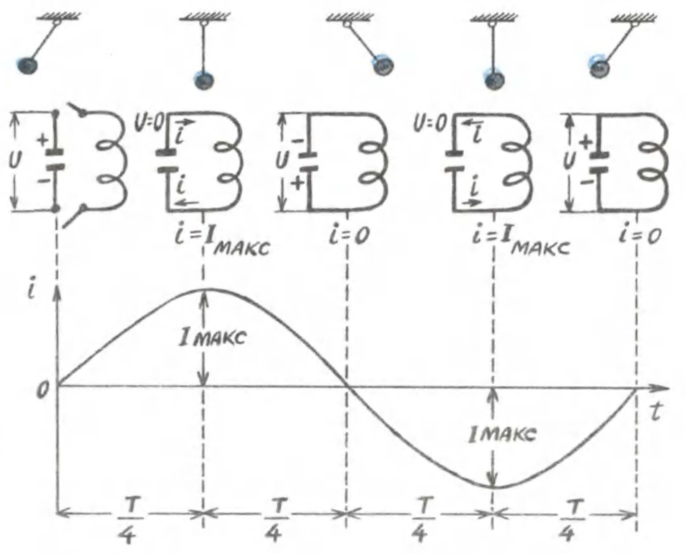
Колебательный контур состоит всего из двух элементов - ка-



Колебательный контур



Энергия конденсатора отдается катушке и энергия катушки отдается конденсатору



Колебания в контуре происходят по синусоидальному закону так же, как и колебания механического маятника

тушки индуктивности L и конденсатора C. Поскольку у каждой из этих деталей всего по два вывода, логично соединить их между собой, как показано на рисунке. Получился параллельный колебательный контур. Конденсатор с катушкой очень дружны и действуют так. Если на конденсаторе оказывается некоторый заряд, он немедленно стекает через катушку, создавая в ней ток. Вокруг витков катушки возникает магнитное поле. Конденсатор отдал весь заряд, и ток в катушке достиг максимума. Но катушка в долгу не остается: возникшее магнитное поле поддерживает ток еще некоторое время (четверть периода колебаний) и этот ток перезаряжает конденсатор. Катушка тоже отдала все – энергия ее израсходована полностью, зато конденсатор снова зарядился и запас почти столько же энергии, сколько ранее отдал катушке. Снова он разряжается на катушку, формируя вторую полуволну, или второй полупериод колебания. Так взаимовыручка двух друзей, катушки и конденсатора, позволяет получать электрические колебания. Однако колебания будут затухающими из-за неизбежных потерь энергии на активном (т. е. действительном, реальном) сопротивлении проводов катушки, соединительных проводников, потерь в диэлектрике конденсатора и в материале, из которого изготовлен каркас катушки.

Для любого резонатора можно определить параметр, называемый добротностью и обозначаемый буквой Q (от англ. quality – качество, добротность). Чтобы долго не мудрствовать с использованием математики, определим добротность не совсем строго, зато физически просто и понятно: добротность численно равна числу колебаний, совершаемых резонатором в процессе их затухания. Если строже, то добротность равна числу колебаний, совершаемых до тех пор, пока их амплитуда не уменьшится примерно до 1/10 первоначального значения. Например, если механический маятник толкнули и он качнулся 15 раз, то его добротность и равна 15. Добротность механических маятников обычно составляет 10...200. Примерно такое же значение добротности может иметь и обычный радиочастотный колебательный LC-контур. А вот пьезокварцевые резонаторы обладают добротностью до нескольких сотен тысяч. Это, кстати, одна из причин, почему генераторы, стабилизированные кварцем, отличаются таким высоким постоянством частоты. Стабильность частоты генераторов, выполненных на LC-контурах, на несколько порядков хуже.

Скорость перезарядки конденсатора катушкой в колебательном контуре определяется их емкостью и индуктивностью, поэтому и период колебаний зависит только от этих величин. В соответствии с хорошо известной формулой Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Частота колебаний обратно пропорциональна периоду $f = 1/T$. Частоту (говорят – частоту настройки) колебательного контура можно изменять, изменяя емкость конденсатора или индуктивность катушки. Конденсатор переменной емкости есть в любом радиоприемнике. Вот как устроен сдвоенный блок конденсаторов переменной емкости (КПЕ) с воздушным диэлектриком.

Пакет статорных пластин неподвижен, а роторные пластины при вращении оси вдвигаются в зазоры между статорными, увеличивая таким образом емкость каждого из входящих в блок конденсаторов. Сдвоенным блоком КПЕ можно перестраивать по частоте одновременно два колебательных контура, что и делается в совре-

менных радиоприемниках. Настройка индуктивностью применяется значительно реже, главным образом потому, что индуктивность труднее изменять в широких пределах. Основной способ изменения индуктивности – это вдвигание внутрь катушки ферромагнитного сердечника.

Сердечник концентрирует и усиливает магнитный поток, увеличивая тем самым и индуктивность. Подстроечный винтовой сердечник есть почти в каждой катушке индуктивности. Он служит для первоначальной подгонки индуктивности при настройке и регулировке приемника или другого устройства. Нет блока КПЕ в автомобильных приемниках – эти приемники традиционно настраивают индуктивностью. Не догадываетесь почему? Причина проста – при движении по тряским дорогам пластины блока КПЕ вибрировали бы, сбивая настройку приемника!

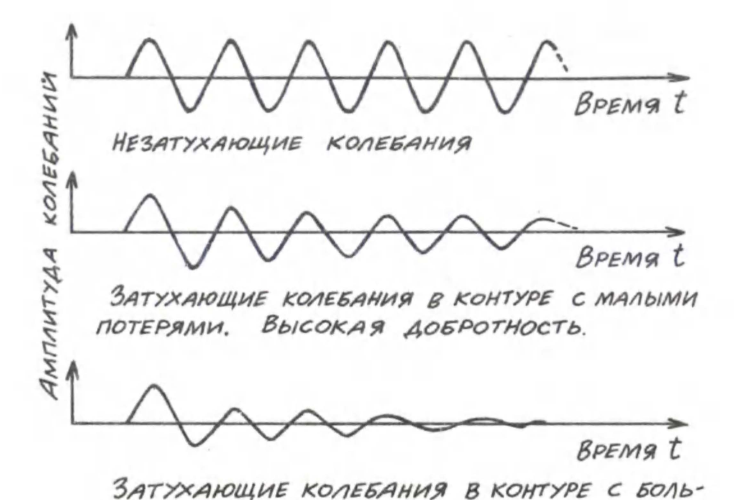
Итак, колебательный контур используют в радиоприемниках для настройки на частоту желаемой радиостанции. А где же еще? Во множестве различных устройств! В радиопередатчиках, например. Кварцевый резонатор устанавливают только в задающем генераторе, определяющем частоту излучаемого сигнала радиостанции. Но после задающего генератора следуют каскады усиления мощности, и в них кварцевые резонаторы применить нельзя – кристалл рассыпался бы в пыль при тех мощностях высокочастотных колебаний, которые характерны для этих каскадов. А колебательный контур может работать при любых мощностях, лишь бы катушка была намотана достаточно толстым проводом да конденсатор имел достаточный зазор между пластинами (иначе в конденсаторе проскакивали бы искры!).

Колебательные контуры применяют и в усилителях высокочастотных колебаний. В отличие от низкочастотных, апериодических усилителей, высокочастотные усилители получили название резонансных. Они усиливают только колебания тех частот, на которые настроены их колебательные контуры. Еще лет десять – пятнадцать назад высокочастотный усилитель вообще нельзя было построить без колебательных контуров – активные элементы, лампы или транзисторы того времени не позволяли этого сделать. Но времена меняются, и с разработкой замечательных высокочастотных транзисторов стало возможным создать усилители, одинаково хорошо работающие в громадной полосе частот – от звуковых до сверхвысоких, например от 300 Гц до 300 МГц! Но такая широкая полоса частот отнюдь не всегда нужна, и тогда по-прежнему широко используют традиционные резонансные усилители с колебательными контурами в каждом каскаде.

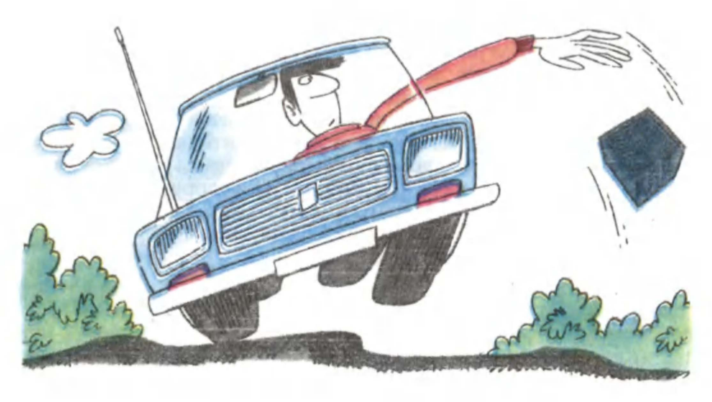
Есть еще одно очень важное применение колебательных контуров, собственно, даже и не контуров, а некоторого числа катушек и конденсаторов, включенных по определенной схеме. Система этих элементов образует электрический фильтр. Поговорим о них подробнее, но прежде разберемся, что же общего характерно для всех описанных случаев применения колебательного контура? Ответ дан в заголовке следующего параграфа.

Резонансные явления

Резонансные явления в радиоэлектронике характерны для всех цепей, включающих катушки индуктивности и конденсаторы, т. е. реактивные элементы. Реактивный элемент, в отличие от активного простого резистора, способен запасать и отдавать энергию, что



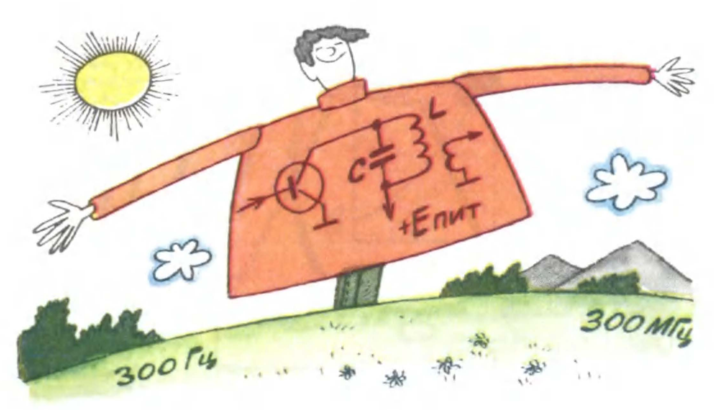
Скорость затухания колебаний в контуре зависит от добротности



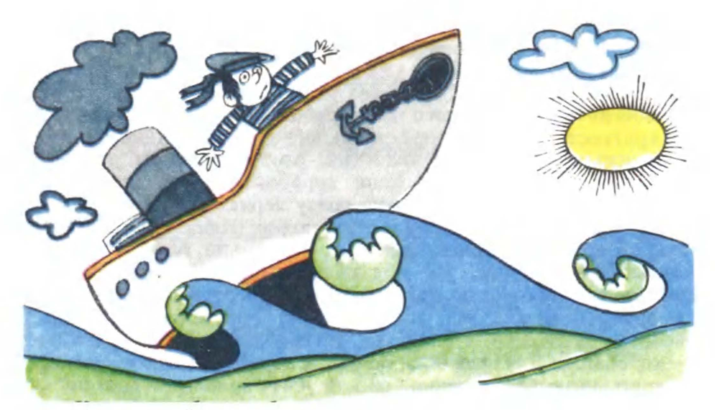
При вибрации пластин воздушного конденсатора изменяется его емкость

и определяет возможность колебательных процессов. Колебательные контуры используют в радиоприемниках, передатчиках, усилителях, фильтрах – т. е. везде, где уже есть электрические колебания, а контур должен откликаться на них. От чего же зависит «мера отзывчивости» колебательного контура (давайте теперь называть его для краткости просто контуром) на внешние колебания? Применив наш испытанный метод аналогий, рассмотрим два примера. Первый пример – с кораблем. Если корабль накренить, а затем «предоставить самому себе», он не сразу вернется в вертикальное положение. По инерции он пройдет положение равновесия, качнется в другую сторону и, совершив несколько колебаний, примет наконец вертикальное положение. Не обязательно экспериментировать с большим кораблем – можно сделать опыт и с игрушечным корабликом в ванне с водой. Из опыта можно определить и период собственных колебаний, т. е. время, за которое совершается одно полное колебание. Для средних и больших кораблей (не игрушечных, а настоящих, разумеется) период собственных колебаний составляет обычно 5...10 с.

Теперь представьте, что корабль раскачивается набегающими волнами. Если волны мелкие и следуют часто, то большой корабль никак на них не реагирует. Волны лишь плещутся у бортов, не вызывая качки. Другой крайний случай: накатываются очень длинные волны и их период намного больше периода собственных колебаний корабля. Такими волнами могут быть, например, волны цунами. В открытом море их очень трудно, если не сказать вообще невозможно, заметить, настолько они длинны. Корабль очень плавно всплывает на очередную волну и также плавно опускается в ложбину между волнами, и происходит это совсем незаметно для находящихся на корабле. Но этого никак нельзя сказать о жителях побережья, ведь всем известно, какую громадную энергию несут волны цунами и какие разрушения вызывают они на берегу! Не зря же существует служба цунами, предупреждающая о приближении этих разрушительных волн. Получив предупреждение, корабли стараются отойти подальше в открытое море, а жители побережья – эвакуироваться подальше от берега на возвышенные места суши.

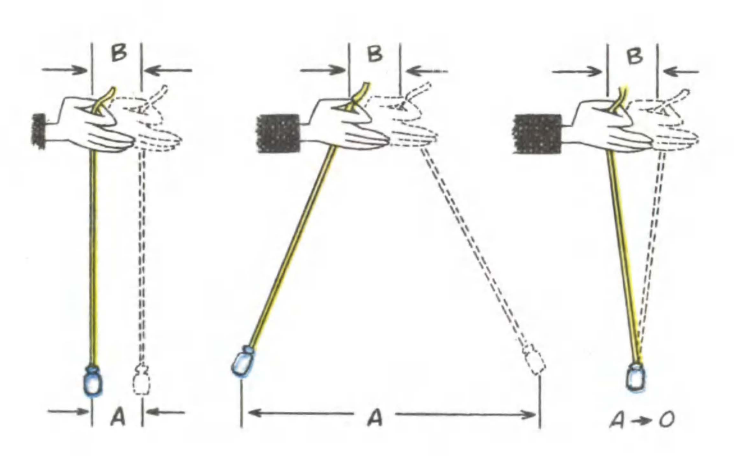


Каскад резонансного транзисторного усилителя



Качка корабля особенно сильна при резонансе

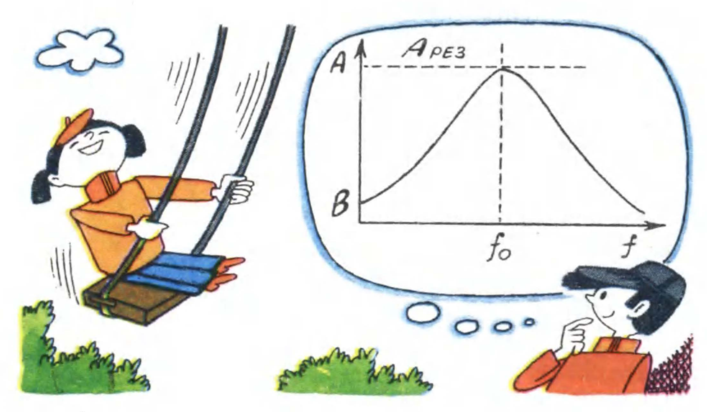
Ну а если период набегающих волн равен или близок к периоду собственных колебаний корабля? Вот тут-то все и начинается! Даже если волны не очень большие, корабль сильно раскачивает. Палуба медленно и «муторно» валится из-под ног куда-то вниз и вбок. И только ты приспособился к наклонному положению относительно стен каюты, надстроек, мачт и горизонта, как палуба вдруг подпирает снизу, несет тебя куда-то вверх (при этом внутри что-то сладковато-тошновато замирает), и ты снова без всякой надежды ждешь, когда же, наконец, кончится это изматывающее тело и душу движение! Надеюсь, что я не очень напугал вас, читатель, кратким описанием начинающейся морской болезни. Хотелось лишь подчеркнуть тот факт, что при совпадении периодов внешних и собственных колебаний отклик корабля максимален.



Экспериментальное наблюдение резонанса

Другой пример, и одновременно эксперимент. Возьмите грузик и привяжите его на нитку длиной 20...30 см. Держите нитку за свободный конец и покачивайте рукой из стороны в сторону, сначала очень медленно. Качание руки в этом опыте будет внешним воздействием. Следите, чтобы амплитуда внешнего воздействия во всех случаях была одинаковой – достаточно перемещать руку всего на 1...2 см в каждую сторону. При медленном перемещении руки грузик точно отслеживает внешнее воздействие, а нитка всегда остается вертикальной. Заметили этот результат? Теперь убыстряйте движение руки. Частота внешнего воздействия увеличивается, и амплитуда качаний маятника тоже увеличивается, хотя амплитуда внешнего воздействия осталась прежней! Наконец наступает момент, когда маятник раскачивается очень сильно. Амплитуда его колебаний намного превосходит амплитуду внешнего воздействия. Это явление называется резонансом. Еще увеличьте частоту качаний руки. Амплитуда колебаний маятника заметно уменьшится, а если вы будете двигать рукой очень быстро, с высокой частотой, грузик будет оставаться практически на месте в силу своей инерции.

Проведя физический эксперимент, мы сделали только половину дела. Вторая половина, причем более важная,– осмысление и обработка результатов. Лучше и к тому же нагляднее изобразить результаты эксперимента графически, что мы сейчас и сделаем. Отложим по горизонтальной оси частоту внешнего воздействия f, а по вертикальной оси – амплитуду колебаний маятника A. При очень низкой частоте внешнего воздействия (медленное движение руки) амплитуда колебаний A равна амплитуде внешнего воздействия B. При резонансе, когда частота колебаний руки совпадает с собственной частотой маятника f_0, амплитуда колебаний максимальна, что хорошо видно на графике. И наконец, когда частота внешнего воздействия намного больше частоты собственных колебаний $f \gg f_0$, амплитуда колебаний становится исчезающе малой. То, что мы получили на графике, называется кривой резонанса. Ее неоднократно экспериментально определяли для различных колебательных систем (маятников, мостов, кораблей, электрических цепей) и неоднократно рассчитывали теоретически. Существует серьезная и весьма сложная наука – теория колебаний, занимающаяся изучением



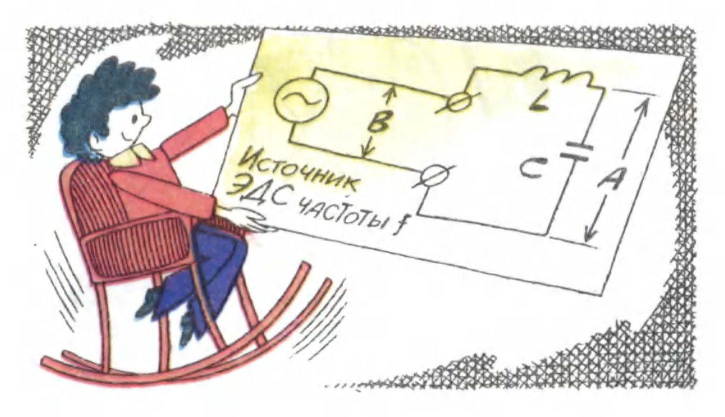
Кривая резонанса

различного рода колебательных движений в механике, гидроакустике, электронике и во многих других областях техники. Любопытно, что столь разнородные колебания описываются одними и теми же математическими уравнениями, что объясняется одинаковым (колебательным) характером движения. Разумеется, рассмотренный нами импровизированный маятник – грузик на ниточке – представляет для теории колебаний наипростейший случай.

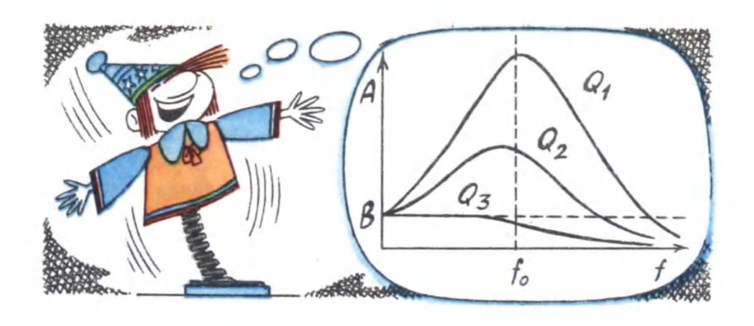
Но мы опять увлеклись маятниками и чуть не забыли про электрический колебательный контур. Как в нем протекают процессы при воздействии внешнего напряжения? Да абсолютно так же! Чтобы ввести в контур внешнее напряжение, придется разорвать один из проводов, соединяющих конденсатор с катушкой, и включить в этот разрыв источник внешней ЭДС *B*. Теперь у нас получился последовательный колебательный контур. Амплитуду колебаний будем наблюдать, измеряя напряжение *A* на конденсаторе контура. Это можно сделать с помощью осциллографа или вольтметра переменного тока. Собственная частота контура по-прежнему определяется индуктивностью и емкостью. Она рассчитывается по уже известной нам формуле Томсона

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Внимательный читатель скажет: «На странице 58 была другая формула!». На самом деле формула одна и та же, ведь частота колебаний обратно пропорциональна периоду $f_0 = 1/T$. А вот частоту внешнего воздействия – напряжения *B* – мы теперь будем изменять от нуля до очень больших значений. Нулевая частота означает отсутствие колебаний, т. е. постоянное напряжение. Естественно, что в этом случае напряжение на конденсаторе *A* в точности равно приложенному *B*, ведь катушка для постоянного тока представляет очень малое сопротивление, а конденсатор – очень большое. При нулевой частоте внешнего напряжения мы получаем начальную точку кривой резонанса. При частоте внешнего воздействия, близкой к собственной частоте контура, отклик контура максимален и переменное напряжение на конденсаторе имеет амплитуду, намного



Колебательный контур с источником ЭДС



Резонансные кривые контуров с различной добротностью ($Q_1 > Q_2 > Q_3$)

большую амплитуды внешней ЭДС. Это пик резонансной кривой. А при очень высоких частотах отклик контура стремится к нулю, что объясняется увеличением реактивного сопротивления катушки и уменьшением реактивного сопротивления конденсатора. Одним словом, резонансная кривая получается точно такой же, как и для механического маятника – грузика на веревочке.

Возникает естественный вопрос: а насколько же амплитуда колебаний при резонансе $A_{рез}$ больше исходной амплитуды внешнего воздействия B? Это зависит от одной очень важной характеристики колебательной системы – ее добротности Q. Добротность равна отношению $A_{рез}/B$. Чем меньше потери энергии колебаний внутри системы – на трение в маятнике, на преодоление током омического сопротивления катушки в контуре,– тем выше добротность. О добротности мы уже говорили; она примерно равна числу колебаний, совершаемых в системе, «предоставленной самой себе», т. е. числу свободных затухающих колебаний.

На графике показаны резонансные кривые колебательных систем с разной добротностью – высокой Q_1, умеренной Q_2 и малой Q_3. В радиотехнических колебательных контурах обычно стремятся получать максимальную добротность. Это выгодно в тех случаях, когда используется лишь верхний, самый острый участок резонансной кривой, например для настройки на частоту радиовещательной станции. У таких контуров определяют полосу пропускания $2\Delta f$ как расстояние (по частоте) между точками, где амплитуда колебаний падает до 0,7 резонансного значения. Полоса пропускания опять-таки связана с добротностью:

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}.$$

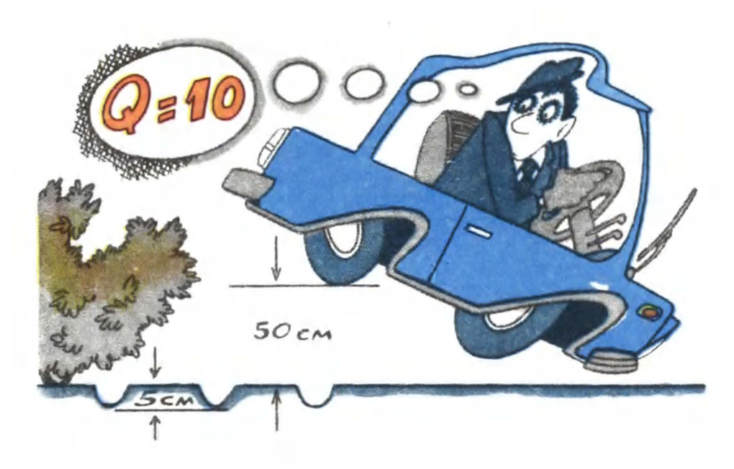
Например, чтобы контур, настроенный на частоту радиостанции второй Всесоюзной программы «Маяк» 549 кГц, имел полосу пропускания 11 кГц, его добротность должна быть равна 50. Здесь уместно отметить, что такая полоса пропускания контура обеспечивает передачу двух боковых полос АМ сигнала, соответствующих звуковым частотам до 5,5 кГц, что даст удовлетворительное воспроизведение музыкальных передач. Всегда ли надо стремиться

3–647

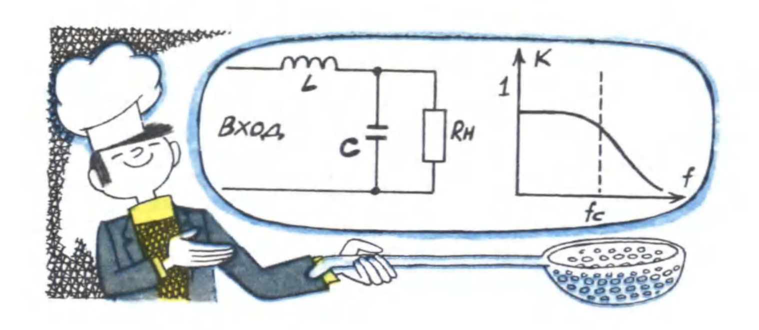
получать столь высокую добротность контура? Оказывается, нет, и есть ряд электрических цепей, где высокая добротность вовсе не нужна. На них мы и остановимся.

Электрические фильтры

Принцип «чем больше, тем лучше» справедлив не всегда. Высокая добротность не нужна кораблю как колебательной системе. Иначе, попади он в резонанс с набегающими волнами, его раскачает так, что начнется черпание воды бортами, зарывание носом под воду и тому подобные неприятные явления. Следовательно, при проектировании обводов подводной части корабля надо стремиться получать не только минимальное сопротивление движению вперед, что обычно и делается, но и максимальное сопротивление качке. И уж совсем высокая добротность не нужна рессорной или пружинной подвеске автомобиля. Допустим на минуту, что она равна десяти. Тогда, проехав ряд выбоин на асфальте глубиной 5 см, автомобиль может подпрыгнуть на полметра! Это произойдет, если толчки от выбоин попадут в резонанс с собственными колебаниями автомобиля. Предоставим читателю самому оценить «прелести» такой езды, но обратим его внимание на то, что подвеска автомобиля не мыслится без амортизаторов - специальных устройств, поглощающих энергию колебаний и снижающих добротность подвески автомобиля примерно до 1...3. Ну вот, а теперь после такой «механической» подготовки обратимся к электронике. Допустим, необходимо пропустить к усилителю некоторый диапазон звуковых частот. Сигнал поступает от радиоприемника, или тюнера, как теперь часто называют собственно радиоприемник без усилителя звуковой частоты. Передача сопровождается помехой – свистом высокого тона. Свист, естественно, надо бы ослабить. В этом случае поможет фильтр нижних частот. Его амплитудно-частотная характеристика соответствует резонансной кривой контура очень низкой добротнос-



Высокая добротность подвески может стать причиной аварии

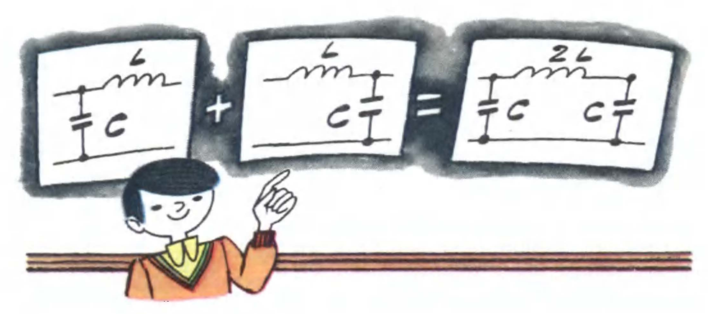


Г-образный фильтр нижних частот

ти, близкой к единице. Все частоты от самых низких до резонансной частоты пропускаются фильтром без ослабления, а более высокие ослабляются. Но как понизить добротность контура до единицы? Взять очень плохую катушку индуктивности с большим омическим сопротивлением? Или конденсатор с плохой изоляцией между пластинами? Конечно, это не лучший выход из положения. Ведь энергия сигнала будет бесполезно теряться в проводах катушки или в диэлектрике конденсатора. Гораздо выгоднее подключить к контуру полезную нагрузку, в нашем примере – входное сопротивление усилителя звуковой частоты. Тогда и добротность контура понизится, а поглощаемая энергия колебаний направится туда, куда нужно. Это как раз тот редкий случай, когда «и волки сыты, и овцы целы».

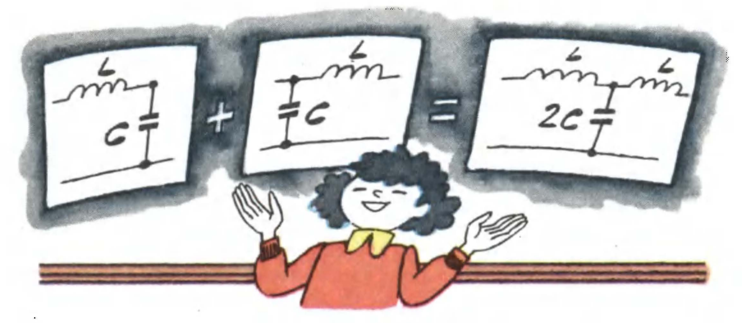
На рисунке показана схема простейшего Г-образного фильтра нижних частот. Конденсатор с катушкой по-прежнему дружно образует колебательный контур, в разрыв одного из соединительных проводов подается входной сигнал, а параллельно конденсатору присоединена полезная нагрузка, в нашем примере – входное сопротивление усилителя звуковой частоты. Приведем очень простые соотношения, позволяющие выбрать величины входящих в фильтр элементов. Добротность контура, который теперь называется уже звеном фильтра, определяется соотношением сопротивления нагрузки и реактивного сопротивления конденсатора или катушки. Почему «или»? Потому что на резонансной частоте реактивные сопротивления конденсатора и катушки равны друг другу! Напомним, что емкостное сопротивление конденсатора $X_C = 1/2\pi f_c C$, а индуктивное сопротивление катушки $X_L = 2\pi f_c L$. У фильтра резонансную частоту называют частотой среза. Когда частота входного сигнала равна резонансной частоте контура или, как говорят, частоте среза фильтра, $X_L = X_c$. А добротность контура $Q = R_н/X_L = R_н/X_c$. Отсюда при $Q = 1$ получаем для фильтра $L = R_н/2\pi f_c$, $C = 1/2\pi f_c R_н$. Этими простыми формулами с успехом можно пользоваться при расчете фильтров.

Чтобы фильтр работал эффективнее, соединяют последовательно несколько простейших звеньев. Вспомните: если вам требуется хорошо профильтровать какую-либо жидкость, вы складываете марлю или фильтровальную бумагу в два-три слоя и уж только потом закладываете ее в воронку! Звенья фильтра соединяют так, чтобы можно было объединить соседние элементы. Например, так:



Два полузвена образуют П-*образное звено*

Получилось П-образное звено. Или так:



Два полузвена образуют Т-*образное звено*

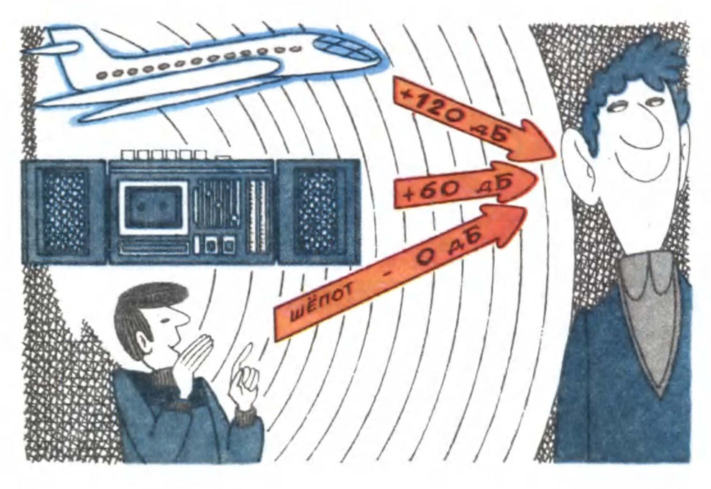
Получилось Т-образное звено. Оба они состоят из двух Г-образных простейших звеньев и обеспечивают... Так и хочется сказать: вдвое большее ослабление. Это будет верно, но только в том случае, если ослабление считать в децибелах. А если просто, как мы привыкли, в «разах»? Например, сигнал с частотой в три раза выше частоты среза простое Г-образное звено ослабит примерно в десять раз. А два звена, думаете, в двадцать раз? Ничего подобного – в сто! Коэффициенты передачи звеньев K перемножаются. Но тогда логарифмы этих величин должны складываться. Вот почему радиоинженеры так любят логарифмическую единицу ослабления или усиления – децибел (дБ). В децибелах можно измерить отношение любых двух величин, например отношение выходного напряжения фильтра к входному, пользуясь соотношением

$$K_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

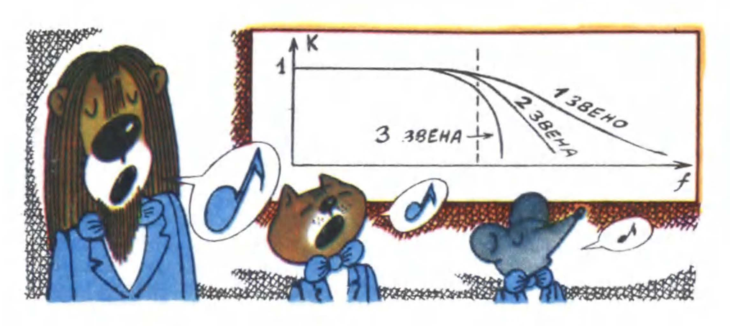
Но отношение выходного напряжения к входному и есть коэффициент передачи фильтра! В нашем примере для Г-образного звена он составляет – 20 дБ, а для двух Г-образных звеньев, соединенных последовательно, т. е. для П- или Т-образного звена, – 40 дБ. Знак

«минус» указывает на то, что происходит ослабление сигнала (в случае усиления был бы знак «плюс»). Как видим, единица децибел действительно очень удобна, а чтобы это полностью оценить, к ней нужно просто привыкнуть. Люди, умеющие пользоваться логарифмической линейкой, редко отказываются от нее, а к микрокалькулятору обращаются лишь для выполнения особо точных расчетов. Числа на линейке нанесены в логарифмическом масштабе, поэтому для умножения или деления двух чисел достаточно сложить или вычесть длины отрезков на линейке, соответствующие этим числам. Линейка обеспечивает точность расчетов не хуже 1%. При необходимости большей точности пользуются таблицами логарифмов. Рассказывают о необыкновенном человеке, который соревновался с микрокалькулятором в умножении многозначных чисел. Его секрет объяснялся тем, что, выучив таблицу логарифмов, он вместо умножения мгновенно складывал в уме многозначные числа. С помощью логарифмической линейки или таблиц логарифмов очень удобно переводить отношение двух чисел в децибелы. Многие читатели, вероятно, слышали, что в децибелах измеряют громкость звука, и теперь недоумевают, прочитав только что введенное определение. Никакого противоречия здесь нет. Если говорить строго, то в децибелах измеряют не силу звука, а отношение силы реального звука к силе звука, соответствующего пороговой чувствительности человеческого уха. Например, громкость оркестра оценивают в + 60 дБ, а рев реактивного двигателя – в + 120 дБ. Это значит, что амплитуда звуковых колебаний в первом случае в тысячу, а во втором в миллион раз больше, чем пороговая. Остается только удивляться необыкновенной способности человеческого уха воспринимать столь огромный диапазон громкостей! Ведь если амплитуда колебаний, различающихся на 120 дБ, отличается в миллион раз, то мощность, пропорциональная квадрату амплитуды,– в 10^{12} раз.

Но вернемся к фильтрам. Добавив еще звенья, можно спроектировать фильтр с очень крутым спадом частотной характеристики и

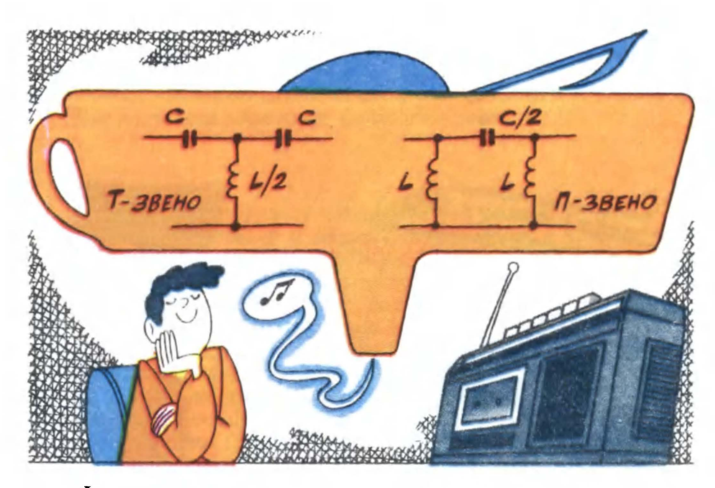


Громкость измеряется в децибелах



Амплитудно-частотные характеристики многозвенных фильтров нижних частот

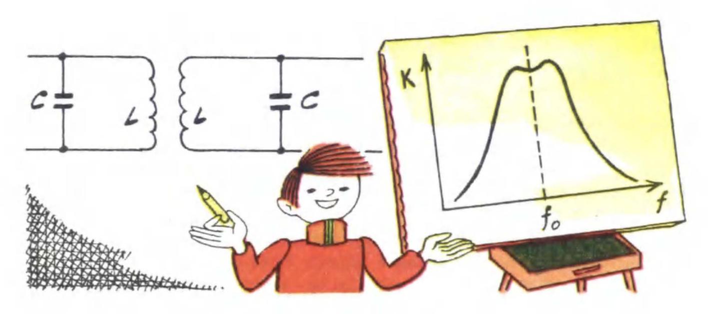
выделить слабый полезный сигнал на фоне очень сильного мешающего. Допустим, надо выделить слабый писк комара на фоне рева реактивного двигателя. Эти звуковые сигналы уже преобразованы в электрические с помощью микрофона. Нужен фильтр, пропускающий высокие частоты (писк) и ослабляющий низкие (рев). Уже известный нам фильтр нижних частот надо видоизменить вместо катушек установить конденсаторы, а вместо конденсаторов - катушки. Получится фильтр верхних частот. Вот схемы П- и Т-образных звеньев такого фильтра:



Фильтры верхних частот

Есть еще одна разновидность фильтров, широко используемая в радиоприемниках,- полосовые фильтры. Дело в том, что простой колебательный контур не слишком хорош для выделения сигнала нужной радиостанции. Ведь в полосу пропускания контура должны войти и несущая, и боковые полосы принимаемого сигнала. Это

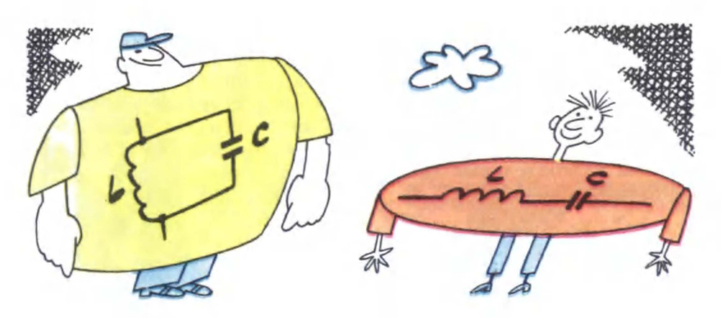
означает, что полоса пропускания не может быть меньше 6...12 кГц. Но рядом с нужной нам станцией работают и соседние, причем разнос их несущих частот составляет всего 9 кГц в диапазонах длинных и средних волн. Одиночный контур с указанной полосой пропускания будет очень мало ослаблять сигналы соседних по частоте станций. Простейший выход из положения – связать друг с другом два колебательных контура:



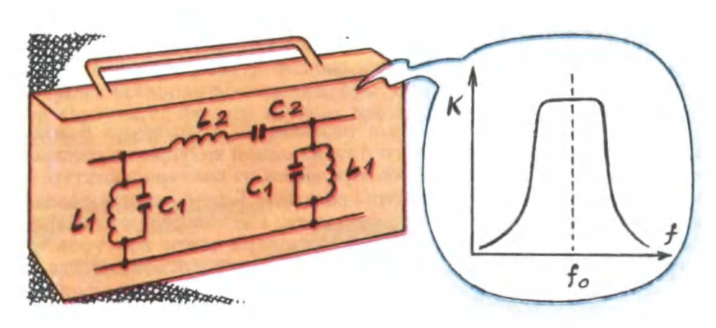
Двухконтурный полосовой фильтр

Если катушки двух контуров размещены достаточно близко друг к другу, то часть магнитного потока одной катушки пересекает витки другой и энергия колебаний передается из контура в контур. В этом случае и говорят, что контуры связаны. Теперь мы знаем, что не веревочкой, а магнитным полем катушек. Сигнал подают на один из контуров, а снимают с другого. Благодаря связи контуров их резонансные частоты несколько изменяются: одного понижается, а другого повышается, причем это изменение тем больше, чем сильнее связь. При определенной величине связи, называемой критической, сдвиг частот становится больше, чем ширина резонансной кривой каждого из контуров. В этом случае общая резонансная кривая двух контуров приобретает характерную «двугорбую» форму. А если связать несколько контуров? Резонансная кривая будет еще ближе к желаемой прямоугольной. При связи контуров больше критической общая частотная характеристика будет иметь столько «горбов», сколько контуров входит в полосовой фильтр (попробуйте вообразить себе многогорбого верблюда!). Подобные фильтры, называемые фильтрами сосредоточенной селекции, сокращенно ФСС, очень часто применяют в радиоприемниках всех классов сложности.

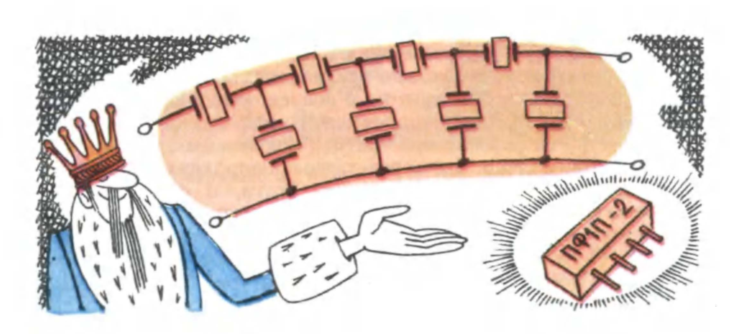
В полосовых фильтрах можно устанавливать не только параллельные колебательные контуры, но и последовательные. На рисунке приведены их схемы. Если сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте максимально, то последовательного – минимально. Здесь реактивные сопротивления конденсатора и катушки компенсируют друг друга, и остается лишь небольшое активное сопротивление провода катушки. При отклонении же частоты от резонансной реактивное сопротивление последовательного контура резко возрастает. На рисунке показана схема одного звена П-образного полосового фильтра, использующего и параллельные, и последовательный контуры. Все три контура настроены на одну и ту же частоту, которая и будет средней частотой полосы пропускания фильтра.



Параллельный и последовательный колебательные контуры



Полосовой фильтр и его характеристика

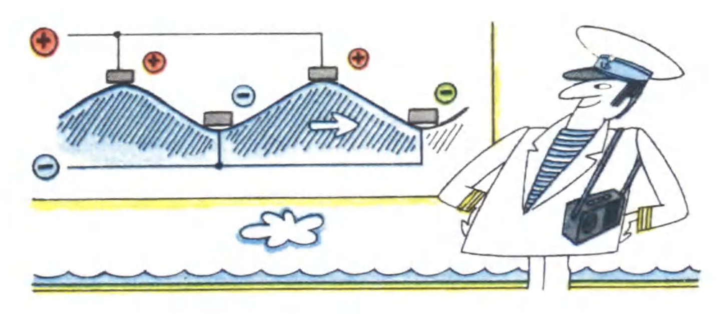


Пьезокерамический фильтр

Наконец, просто необходимо рассказать об одной из «изюминок» современной электроники – кварцевых и пьезокерамических фильтрах. Колебательные контуры в фильтре можно заменить кварцевыми кристаллами, являющимися превосходными резонаторами. Фильтр от этого только выиграет. Кварцевый фильтр позволяет получать почти идеальную частотную характеристику, близкую по форме к прямоугольной. Даже на весьма высоких частотах порядка единиц и десятков мегагерц кварцевые фильтры могут иметь полосу пропускания всего несколько килогерц. Это объясняется высокой добротностью кварцевых резонаторов. С обычными *LC*-контурами такие результаты недостижимы. Кварцевые фильтры широко применяют в высококачественной аппаратуре для радиосвязи.

На более низких частотах используют резонаторы более дешевые и с худшей добротностью. Их изготавливают из искусственной пьезокерамики. Во многих портативных радиоприемниках установлен восьмирезонаторный пьезокерамический фильтр сосредоточенной селекции (ПФ1П), схема и внешний вид которого показаны на рисунке. И совсем ненапрасно на лицевой панели приемников с этим фильтром пишут слова: «высокая селективность». Кварцевым и пьезокерамическим фильтрам принадлежит большое будущее, поскольку все резонаторы фильтра можно выполнять на одном кристалле, используя ту же технологию, что и при производстве интегральных микросхем. Изготовленные таким образом фильтры называют монолитными, подчеркивая этим, что фильтр уже не содержит отдельных элементов, а выполнен как одно целое.

Еще одна интересная и перспективная разновидность монолитных фильтров появилась в связи с разработкой устройств на поверхностных акустических волнах, сокращенно ПАВ. Вот что это такое. «Бросая в пруд камешки, наблюдайте круги, образуемые ими», – говорил Козьма Прутков. От брошенного камня на поверхности воды расходятся волны. Подобным же образом и по поверхности пьезокристалла расходятся волны от точки, где эти волны возбуждаются. Скорость волн составляет несколько километров в секунду, она зависит только от упругих свойств материала, а длина волны на частотах радиодиапазона измеряется миллиметрами. Если расположить в ряд несколько возбуждающих электродов, то будет наблюдаться интерференция волн, излучаемых каждым из них. Гребенка электродов, показанная на рисунке, создает волну в указанном стрелкой направлении только в том случае, если расстояние между электродами составляет половину длины волны. А длина волны зависит от частоты возбуждающего сигнала, следовательно, возбуждение волн возможно только на одной определенной частоте. Подобным же образом действует и приемная решетка электродов. Она реагирует на волны только вполне определенной длины, а именно такой, при которой возбуждение всех электродов происходит в одной и той же фазе. Пластинка пьезоэлектрика с двумя парами гребенок электродов образует фильтр, настроенный на вполне определенную частоту. Изменяя геометрические размеры и конфигурацию электродов, можно получать требуемые параметры фильтра: частоту настройки, полосу пропускания и т. д. Фильтры на ПАВ уже широко используют в радиосвязи. В профессиональной аппаратуре они позволяют, например, получать полосу пропускания 3 кГц на частоте в несколько десятков мегагерц. Нашли применение эти фильтры и в телевизорах нового поколения. Там они более широкополосны – имеют полосу пропускания в несколько мегагерц.

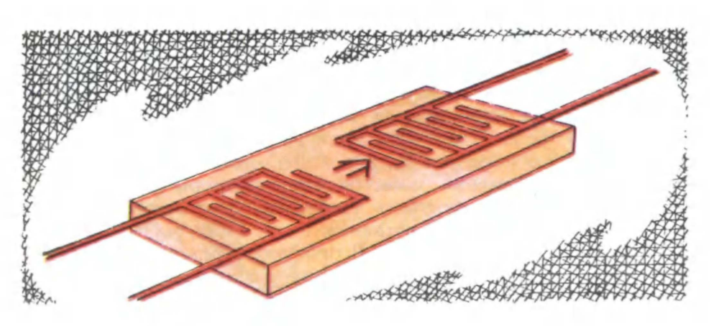


Возбуждение ПАВ решеткой электродов (знаками «+» и «−» обозначена мгновенная полярность напряжения, через половину периода полярность изменится на обратную, а гребни волны займут место впадин)

Теперь мы с вами знаем, как с помощью фильтров можно из огромного числа различных электрических колебаний выделить только определенные, нужные нам. Эта задача первостепенной важности и в радиоприемнике, и в телевизоре, и в устройствах многоканальной связи, и во многих других приборах. Как говорят специалисты, фильтры осуществляют частотную селекцию сигналов. Но прежде чем выделить сигналы нужной частоты, эту частоту надо знать и уметь измерить, а для этого нужен инструмент измерений.

Эталоны времени и частоты

Представьте себе ситуацию: кварцевые кристаллы для фильтра изготавливались на разных заводах. На каждом кристалле имеется обозначение одной и той же частоты, скажем 10 МГц. Собрали фильтр... и ничего не вышло. Вместо требуемой почти прямоугольной характеристики с плавно скругленными скатами получился ряд каких-то зубцов. Проверили кристаллы – они оказались настроенными на разные частоты. Обратились на один завод, там отвечают: «Мы настраивали на 10 МГц». Обратились на дру-



Монолитный полосовой фильтр на ПАВ

гой – тот же ответ. Возникает естественный вопрос: а чем измеряли частоту? С чем ее сравнивали? С каким образцом или эталоном?

Мы рассмотрели совершенно немыслимый в современном производстве случай, когда каждый завод «на свой аршин меряет». Если бы все измеряли «своими аршинами», нельзя было бы из заводских деталей собрать ни станок, ни автомобиль, ни один подшипник не подошел бы к своему валу, ни одна гайка – ни к одному винту, да что там говорить, произошло бы всеобщее и сокрушительное бедствие! Вот как важны точные и стандартизованные измерения в современной индустрии. Этим занимается специальная наука – метрология. В отношении же измерения частоты «аршин» теперь у всех один - эталонная частота атомного стандарта. Ну а где частоты, там и время.

Частота обращения Земли вокруг Солнца задает единицу времени – год. Частота вращения Земли вокруг оси – другую единицу – сутки. Сутки делятся на часы, часы на минуты и секунды. Долгие годы астрономическая секунда была единственным эталоном времени. Но требования науки и техники все возрастают, а астрономическая секунда оказалась недостаточно точна. Вращение Земли неравномерно, оно подвержено влиянию притяжения других планет, приливов и отливов, многих других факторов. Изменения частоты вращения Земли ничтожно малы, но для современных приборов весьма заметны. А время надо знать точно. Отсчет секунд перед стартом космического корабля должен вестись по одной шкале и на космодроме Байконур, и на удаленном дальневосточном наблюдательном пункте, и на корабле слежения, дрейфующем в Индийском океане. Только тогда сообщение наблюдателей, что через 78,35 с после старта «пошла телеметрия», будет иметь смысл. Но не это главное. Например, надо очень точно измерить частоту принятого телеметрического сигнала, чтобы по ее доплеровскому сдвигу рассчитать и скорректировать орбиту вновь выведенного космического корабля. Время нужно не только знать, его нужно хранить и беречь и в переносном, и в буквальном смысле. Когда участники экспедиции Витуса Беринга отправились на лошадях через всю Россию из Петербурга к берегам Охотского моря, они везли не только канаты, парусину, якоря и прочее оборудование, они везли с собой и хронометры. Тщательно упакованные хронометры держали на коленях в течение всего путешествия, чтобы нечаянным толчком не сбить, не нарушить отсчитываемый ими ход времени. «Привезя» в Охотск гринвичское время, удалось довольно точно определить долготу неизвестных ранее географических пунктов. Ведь долгота измеряется по разности местного, определяемого по солнцу, и гринвичского времени (напомню, что в Гринвиче, вблизи Лондона, находится обсерватория, через которую проходит нулевой меридиан).

Теперь все гораздо проще: гринвичское, да и любое другое время, можно узнать по радио. И не только по сигналам точного времени, передаваемым каждый час любой радиовещательной станцией. Есть и специальные станции, передающие эталонные частоты атомных стандартов. В европейской части СССР можно принять эталонную частоту 66,(6) кГц, передаваемую из Москвы, а в азиатской части - 50 кГц, передаваемую из Иркутска. Передается ряд частот и из других мест, в том числе и в диапазоне коротких волн. С такой техникой долготу географических пунктов удается определять с точностью до малых долей угловой секунды. Этими же частотами синхронизируются вторичные эталоны Государственной службы времени и частоты.

Сказав о вторичных, надо рассказать и о первичном эталоне времени. Ведь эталоны нужны при любых измерениях. В СССР используется международная система единиц (СИ). Основными в этой системе являются: единица длины – метр, массы – килограмм и времени – секунда. Кроме того, к основным относятся: единица силы тока – ампер, температуры – кельвин и силы света – кандела. Все другие единицы – производные от основных.

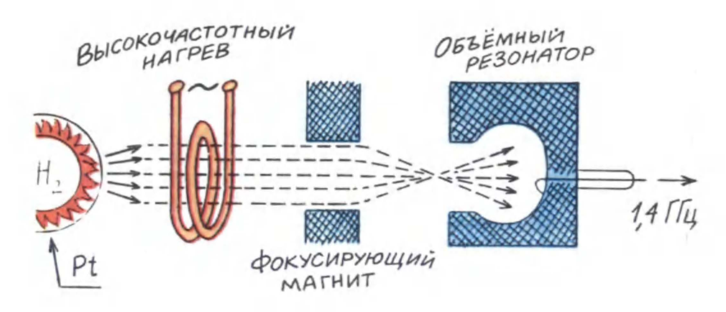
Первичным эталоном килограмма является масса бруска из платиново-иридиевого сплава, мало подверженного коррозии и другим химическим воздействиям. Эталон с максимальными предосторожностями хранится в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа, и лишь изредка извлекается из хранилища для проверки (сличения) привозимых вторичных эталонов.

За эталон метра ранее считали 1/40 000 000 часть длины меридиана Земли, проходящего через Париж. Был и более реальный эталон – стержень метровой длины, изготовленный из инвара – сплава с малым температурным коэффициентом расширения. Точность этого эталона была невысока и определялась точностью и тщательностью геодезических измерений на поверхности Земли. Был выбран более точный, атомный стандарт. Метр определили как длину, равную 1 650 763, 73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего одной из спектральных линий (оранжевой) атомов криптона-86. Длины волн спектральных линий атомного излучения очень стабильны и практически не зависят от внешних условий, поэтому у нового стандарта появилось важное достоинство – повторяемость и воспроизводимость в разных условиях.

Наконец, в самое последнее время предложен новый эталон. Длиной в один метр стали считать путь, проходимый световой волной в вакууме за 1/299 792 458 часть секунды. В основе нового эталона лежит фундаментальный факт постоянства скорости света в вакууме. Но теперь метр оказался связан с другой основной единицей СИ – секундой, и точное определение эталона времени приобрело особо важное значение. Здесь уместно отметить, что измерение времени и частоты теперь научились выполнять намного точнее всех других физических измерений.

Основой любого эталона времени является элемент, который совершает (или в котором совершаются) колебания. В часах это маятник, в астрономическом эталоне – сама планета Земля, ведь ее вращение, как мы уже убедились, можно представить суммой двух колебаний с одинаковыми частотами, совершаемых в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В электронных часах колебательным элементом служит кварцевый кристалл, а в атомном стандарте – электронные оболочки атомов рабочего вещества. Секунда сейчас определяется как время, за которое совершается 9 192 631 770 периодов колебаний в излучении, соответствующем переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Вероятно, вы знаете, что атомы поглощают и излучают электромагнитную энергию порциями – квантами. В атоме любого вещества электроны располагаются не на каких попало, а на вполне определенных орбитах. Каждой орбите соответствует определенный уровень энергии атома. Если состояние электрона изменяется, то излучается или поглощается квант, энергия которого в точности равна разности энергий в новом и прежнем состоянии атома. Энергия кванта прямо пропорциональна его частоте, поэтому частоты переходов между энергетическими уровнями очень стабильны. На частотах радиодиапазона энергия квантов очень мала, и для



Устройство водородного стандарта частоты

создания эталонов приходится подбирать атомы, имеющие сверхтонкую структуру энергетических уровней. Кроме цезия такую структуру уровней имеют и атомы водорода.

Атом водорода, наипростейший из всех известных, состоит из единственного протона, образующего ядро, и единственного электрона. Спектр излучения водорода содержит серии линий в областях ультрафиолетовых, видимых, и инфракрасных волн. Но есть одна особая линия. Электрон вращается вокруг ядра не только по своей орбите, но и вокруг собственной оси. Такое вращение назвали спином (от англ. spin – волчок, веретено). Спины электрона и ядра могут быть параллельны (вращение в одну сторону) и антипараллельны (вращение в разные стороны). Переход атома из одного состояния в другое соответствует сверхтонкой структуре энергетических уровней. При этом переходе излучается электромагнитная волна около 21 см, лежащая в радиодиапазоне.

Устройство атомного эталона рассмотрим на примере водородного стандарта частоты. В камере, из которой до глубокого вакуума откачан воздух, имеется «атомная пушка» – окно из губчатой платины, тоненькой струйкой пропускающее атомы водорода. Они подвергаются нагреву высокочастотным полем, которое возбуждает часть атомов, т.е. переводит их на уровень с большей энергией. Затем пучок атомов пропускают через фокусирующую систему – магнит с сильно неоднородным полем. Он «отсеивает» невозбужденные атомы, а возбужденные попадают в металлический цилиндр – объемный резонатор, где и отдают энергию в виде электромагнитных колебаний. Энергия отводится из резонатора коаксиальным кабелем. Метрологический водородный стандарт имеет очень хорошую долговременную стабильность и воспроизводимость частоты. Его частота равна 1 420 405 751, 786 ± 0,001 Гц, а стабильность порядка 10^{-13}. Выходной сигнал резонатора усиливают, многократно делят по частоте и получают стандартные интервалы времени 0,1; 1 с и т.д. Для повышения стабильности водородный стандарт тщательно термостатируют и экранируют даже от магнитного поля Земли.

Надо отметить, что колебания могут существовать не только в электрических цепях, но и в свободном пространстве. Этот особый вид колебаний называют электромагнитными волнами. О них мы поговорим в следующей главе.

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Начав с самых обыденных предметов: кристаллов поваренной соли, котлов и зеркал, в этой главе мы расскажем о явлениях таинственных и необыкновенных: электромагнитной индукции, звездной аберрации, опытах по возбуждению и приему невидимых и неслышимых излучений. Расскажем об ионосфере Земли и трансокеанских связях, федингах, антиподах, свистящих атмосфериках и в заключение всего – о сигналах из далеких внеземных миров.

Поля и волны

Чего-то не хватает в этом заголовке? Может быть, лучше: «поля, леса и волны»? Тогда все было бы ясно, поговорили бы о просторных полях пшеницы, бескрайнем море лесов и белогривых пенящихся волнах в самом настоящем бескрайнем морском просторе! Но разговор предстоит о других полях и других волнах. Они невидимы, неслышимы и неосязаемы. Нет у человека органов чувств, способных улавливать электрические или магнитные поля, но, как мы видим, человека это не остановило. Он исследовал электромагнитные поля и волны, научился их создавать и улавливать, придумал для этого различные приборы. Приборы явились как бы дополнением к тем органам чувств, которые даны человеку природой, причем дополнением настолько совершенным, что мы теперь видим и слышим на расстояния в миллионы километров!

Мы много рассказали о передаче сигналов в эфир, по радио, но еще ничего не сказали о том, как это делается и какие физические процессы с этим связаны. Когда говорят о передаче в эфир, явно грешат против истины. Человеческий язык консервативен и долго хранит давно отжившие слова. Говорим же мы до сих пор: «Слава богу», хотя прекрасно знаем, что никакого бога нет. Точно так же нет и никакого эфира. Бог нужен был для объяснения таинственных и непонятных явлений. Точно так же и эфир нужен был физикам для объяснения реально наблюдаемых явлений – например, распространения света. Но развитие науки показывает, что существуют и другие объяснения. Оказалось, что свет есть электромагнитная волна, которая может распространяться и в вакууме.

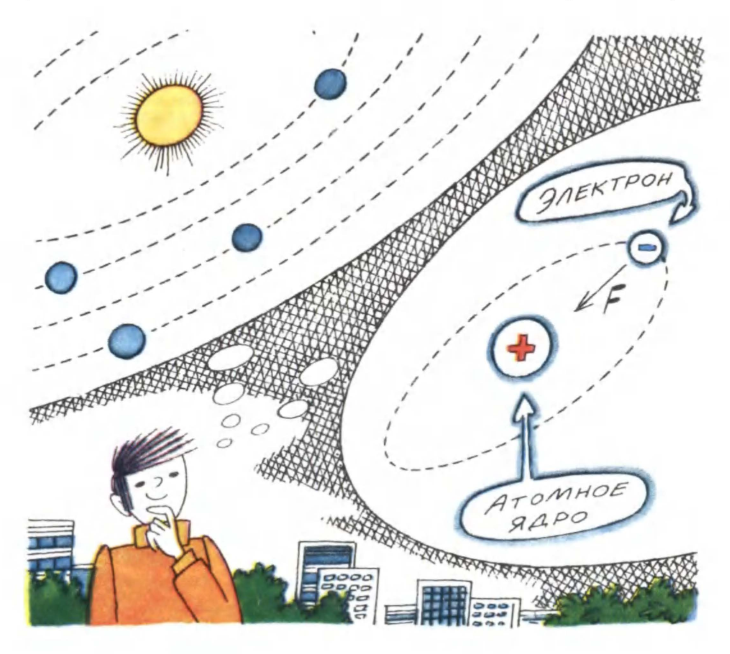
В нашей Вселенной есть две материальные субстанции: вещество и поле. Вещество все мы ясно себе представляем, а вот поле... В понимании физиков поле проявляется благодаря действию каких-либо сил. Силы могут иметь самую разную физическую природу и самое разное происхождение. Почему все тела притягиваются к Земле? Почему мы постоянно чувствуем собственный вес? И откуда он взялся, этот вес? Вес всех предметов обусловлен гравитационным полем Земли. Находясь в поле сил тяжести, все предметы испытывают силу притяжения – она и есть вес.

Кроме гравитационных существуют и другие поля, в частности электрические. Их роль в мире мы явно недооцениваем. Атом составляет единое целое только потому, что легкие отрицательно заряженные электроны находятся в электрическом поле положительно заряженного ядра. Противоположные заряды притягивают-

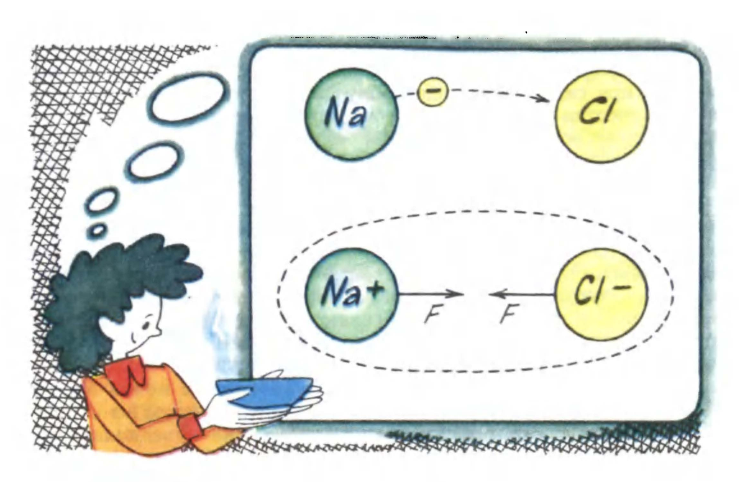
ся, поэтому электрон не так-то легко «оторвать» от ядра. Процесс удаления электрона из «родного» атома называется ионизацией. Она возможна при сильном нагреве, облучении квантами энергии, «обстреле» вещества элементарными частицами высоких энергий. Во всяком случае сообщаемая атомам энергия должна быть больше энергии ионизации атома, которая равна работе, совершаемой против сил поля ядра при «отрывании» электрона.

Атомы объединяются в молекулы электрическими связями. Вот, например, как устроена молекула обычной поваренной соли NaCl. Натрий легко отдает один электрон, находящийся на самой дальней от ядра орбите. Хлор «с удовольствием» захватывает этот электрон. В результате атом натрия становится положительным ионом, а атом хлора – отрицательным. Они притягиваются друг к другу как заряды с противоположными знаками. Так получается молекула. Крупинка поваренной соли представляет собой одну большую «молекулу» – ионный кристалл, состоящий из великого множества ионов Na^+ и Cl^-. Положительные и отрицательные ионы располагаются строго попеременно, вследствие электрических связей они объединяются в кристаллическую решетку, образуя твердое тело. Все окружающие нас предметы оказываются прочными и твердыми только благодаря межатомным электрическим полям.

Все мы знаем, что ядро атома очень мало по сравнению с самим атомом, но в то же время оно содержит почти всю массу атома, примерно 99,95%. Если точка в конце этого предложения условно изображает ядро, то для того, чтобы нарисовать весь атом, понадобится трехметровый лист бумаги! Вот как мало ядро по сравнению с самим атомом. Что же находится в огромном пустом

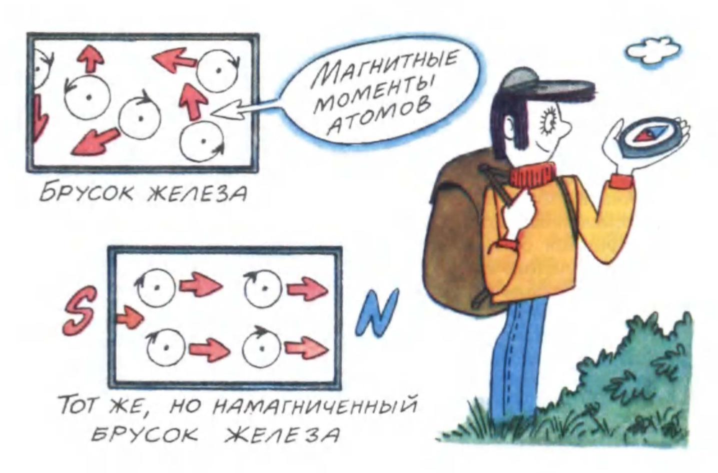


Строение атома



Молекула поваренной соли

Расположение ионов в кристалле поваренной соли



Намагничивание вещества

пространстве в атоме? Не воздух же, так как воздух и сам состоит из атомов, объединенных в еще более крупные молекулы. Электрическое поле! Вот насколько важны электрические поля в мироздании!

Электрические поля создаются зарядами. Но если заряд движется, он создает электрический ток. Обычный ток в проводнике, от которого светится, например, лампочка карманного фонаря,–это направленное движение множества электронов. Такое движение порождает поле иного вида–магнитное. Оно действует на другие движущиеся заряды, т.е. на другие токи. Ну а как же постоянный магнит, спросите вы? На первый взгляд в нем нет никаких токов, а магнитное поле он создает! На самом деле токи есть. Это электроны атомов, движущиеся по орбитам вокруг ядра и вращающиеся вокруг собственной оси. Каждый вращающийся электрон–это маленький кольцевой ток. Он и создает свое маленькое магнитное поле. Пока постоянный магнит не намагничен, все элементарные магнитные поля электронов направлены в разные стороны и их общее, усредненное магнитное поле равно нулю. Чтобы намагнитить кусок железа, надо поместить его в сильное внешнее магнитное поле. Тогда все электроны повернутся так, что их магнитные поля будут направлены в одну и ту же сторону, в сторону внешнего магнитного поля. Теперь уберем внешнее поле. Элементарные магнитные поля сохранят прежнее направление. Кусок железа стал постоянным магнитом. Не все вещества можно намагнитить, а только определенные. К ним относятся сплавы железа, никеля и др., а также искусственно созданные–ферриты. Все они называются ферромагнетиками.

Постоянные электрические и магнитные поля не могут существовать без своих источников, зарядов или токов. Но есть особый и, кстати, самый распространенный вид поля–электромагнитное. Оно может существовать и само по себе, в отрыве от источников. Но только электрическое и магнитное поля в нем должны быть переменными, быстро изменяющимися во времени. А само электромагнитное поле будет представлять собой волны, движущиеся (распространяющиеся) в пространстве.

Только волны

Итак, волны. Так емко, многообразно и содержательно это понятие, выражаемое простым словом, содержащим в лучших традициях телеграфистов, только пять букв (дело в том, что «усредненное» телеграфное слово содержит пять знаков). Волны расходятся и от брошенного в пруд камня, и от говорящего человека, и от звезды, затерявшейся в просторах Галактики, и от самой Галактики, представляющейся булавочной головкой в громадных, бездонных, непостижимых человеческому воображению глубинах открытого космоса. Посредством волн мы получаем практически всю (более 99%) информацию об окружающем нам мире. Почему-то мы считаем реальными только твердые и осязаемые предметы, а волны представляются нам чем-то эфемерным, зыбким и неустойчивым. Однако волны не менее реальны, чем любые твердые и тяжелые предметы.

Электромагнитные волны переносят энергию. Вся жизнь на Земле существует только благодаря энергии Солнца, переносимой к нам электромагнитными волнами инфракрасного, оптического и ультрафиолетового диапазонов. Каждый квадратный метр земной поверхности получает около 600 Вт солнечной энергии. Если бы мы научились всю ее использовать, то на каждом квадратном метре можно было бы включить по электроплитке! А ведь между Землей и Солнцем нет никаких проводов или других материальных «энергетических мостиков» – только космическое пространство!

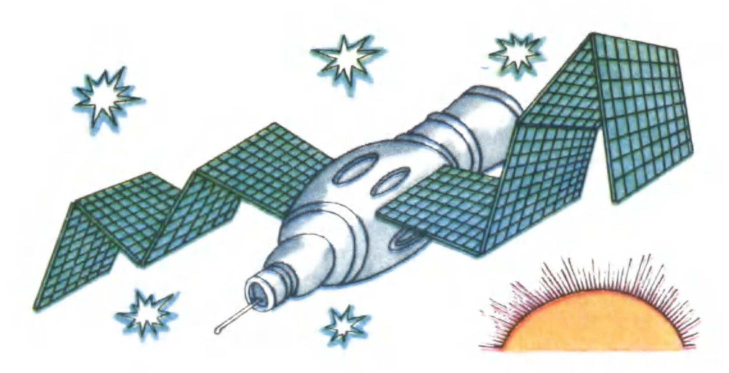
Возможность направленной передачи энергии с помощью электромагнитных волн давно интересует специалистов. Главная проблема заключается в том, чтобы энергия не рассеивалась в пространстве бесполезно, а по возможности вся поступала к потребителю. Следовательно, энергию электромагнитных волн необходимо сконцентрировать в очень узкий луч. Сделать это можно только при использовании очень коротких волн длиной в несколько миллиметров или еще меньше. Дело в том, что хорошо концентрируют энергию только излучатели (антенны) достаточно больших по сравнению с длиной волны размеров. Один из проектов предусматривает строительство в космосе электростанции, превращающей с помощью полупроводниковых солнечных элементов световую энергию Солнца в электрический ток. Этим током должны питаться мощные генераторы сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, снабженные большими антеннами, направленными на Землю. На Земле размещается мозаика из огромного числа приемных антенн с полупроводниковыми СВЧ детекторами, преобразующими энергию сверхвысокочастотных колебаний в постоянный электрический ток. Необходимость в большом числе приемников обусловлена тем, что каждый полупроводниковый приемник может работать лишь при сравнительно небольшой мощности. Но это пока всего лишь проект.

Как преобразовать энергии электромагнитного излучения Солнца в электрическую здесь, на Земле? Проще всего подвесить черный котел с водой в фокусе большого параболического рефлектора - зеркала. Вода в котле нагревается до высокой температуры и превращается в пар, который может вращать небольшую паровую турбину, или использоваться для обогрева теплиц и помещений. Подобные солнечные энергетические установки уже изготавливаются и устанавливаются в южных районах страны, где много солнечных дней в году, но в то же время трудно пользоваться обычными источниками энергии ввиду удаленности от промышленных и энерге-

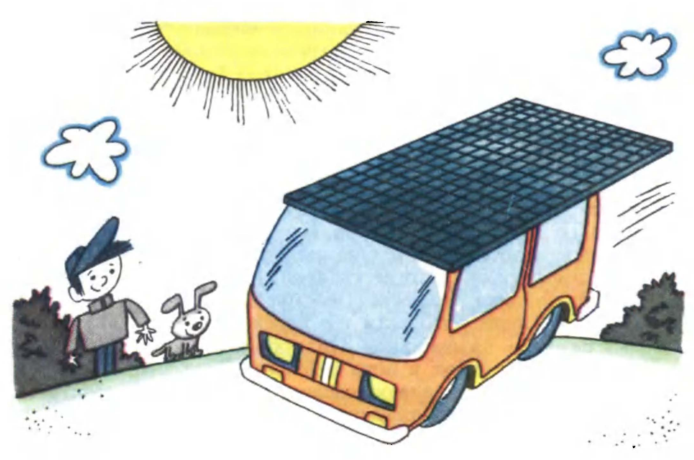
тических центров. Недостаток подобного способа использования солнечной энергии, переносимой электромагнитными волнами, очевиден: коэффициент полезного действия (КПД) паровой машины, так же как и старого паровоза, не превосходит 10...20%. Желательно было найти преобразователи энергии с более высоким КПД. И в этом вопросе бурно развивающаяся полупроводниковая электроника не могла не сказать своего веского слова. Были созданы солнечные элементы – устройства, непосредственно преобразующие энергию световых волн в электрический ток. Если *p-n* переход полупроводникового диода осветить, на выводах диода появится небольшая разность потенциалов. Она вызвана так называемым вентильным фотоэффектом. Энергия квантов света, сообщаемая электронам полупроводника, помогает им преодолеть потенциальный барьер, существующий в области *p-n* перехода, в результате чего и возникает разность потенциалов. Подробнее о *p-n* переходе будет сказано в следующей главе, а пока лишь отметим, что инженерам удалось решить главную задачу – сделать *p-n* переход достаточно большой площади, чтобы можно было собирать больше световой энергии. Один солнечный элемент с размерами 1×3 см развивает ЭДС до 0,5 В. Элементы соединяют в батареи площадью до нескольких квадратных метров. Подобная батарея может генерировать уже несколько киловатт электроэнергии, ведь КПД солнечных элементов очень высок и достигает 70...90%. Солнечные батареи пока еще очень дороги, и поэтому их широко используют лишь для питания электронной аппаратуры искусственных спутников Земли, тем более, что погода вне атмосферы Земли всегда солнечная.

Немало технических новинок с солнечными батареями создано и для земных условий. Сделаны радиоприемники и портативные радиостанции с солнечным питанием. Если первые служат в основном для развлечения, то вторые могут оказаться незаменимыми для геологов, туристов и прочего таежно-бродячего люда. Выпускаются микрокалькуляторы с питанием от солнечных элементов, причем для работы их даже не обязательно выносить на солнце, вполне достаточно света настольной лампы.

Предпринимаются попытки создать и более мощные конструкции – электромобили, яхты с электропитанием от солнечных батарей, однако ясно, что для успешной работы таких систем нужна ясная солнечная погода.



Солнечные батареи на космическом корабле



Электромобиль с солнечными батареями

Энергия, переносимая электромагнитными волнами, зависит от мощности источника и расстояния до него. Солнце – чрезвычайно мощный источник электромагнитной энергии. И хотя расстояние от Земли до Солнца очень велико – оно составляет 149 млн. км, солнечной энергии хватает и для обогрева Земли, и для поддержания на ней жизни. Иное положение на далеких планетах Солнечной системы – там поток энергии значительно меньше. Чтобы установить зависимость потока энергии, переносимой электромагнитными волнами, от расстояния, окружим Солнце воображаемой сферой радиуса R. Через поверхность этой сферы пройдет весь поток энергии, излучаемой Солнцем, а площадь поверхности сферы составит $4\pi R^2$. Увеличив радиус сферы вдвое, мы увеличим ее поверхность в четыре раза. Следовательно, поток энергии, проходящей через один квадратный метр нашей воображаемой поверхности, уменьшится также в четыре раза. Таким образом, поток энергии, переносимой электромагнитными волнами, обратно пропорционален квадрату расстояния от источника. Именно поэтому свет далеких звезд так слаб и его невозможно увидеть днем при ярком сиянии Солнца. И уж конечно, нельзя говорить об энергии света звезд в плане ее практического использования. Но звездный свет нам нужен, без него мы не представляем ясных летних ночей, без него мир был бы намного беднее. Информация, которую несет нам звездный свет, используют навигаторы, ученые, а уж о влюбленных и говорить нечего! Значит, и очень слабый поток электромагнитной энергии может быть чрезвычайно полезен – он может нести информацию!

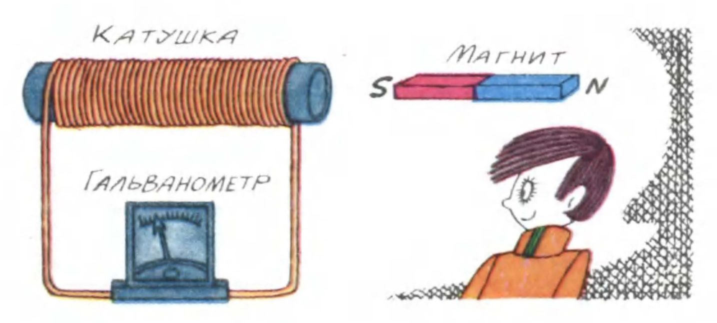
Об информации, передаваемой световыми сигналами, мы уже говорили во второй главе, в частности о кострах на башнях. Для приема этой информации служил один из самых совершенных приемников электромагнитных волн, созданный природой, – человеческий глаз. Но распространение световых сигналов зависит от атмосферных условий – в пасмурную, дождливую и туманную погоду электромагнитные волны светового диапазона сильно поглощаются. Этого недостатка нет у более длинных волн – радиоволн.

История их применения и использования очень коротка, она не насчитывает еще и века, но столь насыщена событиями, необычна и интересна, что о ней стоит поговорить подробнее.

Великие теоретики и великие практики

Путь к познанию и изучению электромагнитных волн был нелегок. Связь магнитного поля с порождающим его током установил Х. Эрстед в 1820 году. Майкл Фарадей, замечательный английский физик-экспериментатор, задался противоположной целью – установить, а не может ли магнитное поле быть причиной возникновения электрического тока. Многочисленные опыты привели к успеху. Сейчас трудно даже представить, что пришлось преодолеть экспериментатору. Любому школьнику ясно, что катушку индуктивности надо наматывать изолированным проводом. Но в 20-х годах прошлого столетия это было совсем не очевидно! Где было взять изолированный провод, ведь промышленность его не выпускала? Да и электротехнической промышленности как таковой еще не было. Неизвестно, выпускалась ли вообще тонкая медная проволока. Поставим себя на место экспериментатора и даже облегчим задачу – допустим, что проволока у нас уже имеется. Для изготовления небольшой катушки ее требуется метров пятьдесят. Значит, нам предстоит обмотать эту проволоку бумагой или полосками ткани, да так, чтобы не осталось неизолированных мест. А теперь проволоку надо намотать на катушку, чтобы не повредить, и не сдвинуть нашу самодельную изоляцию. Не зря великий Т. Эдисон говорил, что научное творчество на 99% состоит из вовсе не творческого, а рутинного труда.

Разумеется, опытами с электричеством занимался не один Фарадей. Рассказывают, например, такой курьезный случай. Один из физиков того времени был очень близок к открытию закона электромагнитной индукции. Он разместил рядом две катушки, к одной из которых был подключен гальванометр, а через другую пропускался электрический ток. Вся беда была в том, что, желая обеспечить чистоту эксперимента, источник тока с выключателем физик разместил в другой комнате. Ток выключен – стрелка гальванометра на нуле, ток включен – стрелка опять на нуле. Она отклонялась в момент включения и в момент выключения тока, но на гальванометр в это время никто не смотрел – физик уходил в другую комнату включать и выключать рубильник.



Опыт по электромагнитной индукции

Кто знает, может быть, теснота лаборатории (не было другой комнаты) помогла Майклу Фарадею открыть и сформулировать закон электромагнитной индукции, носящий теперь его имя. Если магнитное поле, пронизывающее какой-либо контур (проволочный виток, рамку, катушку) изменяется, то в этом контуре возникает ЭДС, а следовательно, и электрический ток. Закон электромагнитной индукции позволил создать динамомашину - генератор электрического тока. Конструкция динамомашины мало изменилась до наших дней, увеличились лишь ее размеры и мощность. Огромные динамомашины-генераторы установлены и на тепловых, и на атомных, и на гидроэлектростанциях. Тем, что теперь в каждой квартире пользуются электроэнергией, что улицы больших и малых городов ярко залиты электрическим светом, ходят электропоезда, трамваи и троллейбусы, - почти всей современной энергетикой мы обязаны Фарадею и многочисленным физикам и электротехникам, работавшим после него.

Что же главное в законе электромагнитной индукции? То, что ЭДС индукции пропорциональна не величине магнитного поля (постоянное поле ЭДС не создает), а скорости его изменения. Ну а что если проволочный виток-контур или катушку убрать, а переменное магнитное поле оставить? Тогда вокруг силовых линий магнитного поля H тока не будет, но останется кольцевое электрическое поле E. Оно как бы порождается изменениями магнитного поля. Обратный эффект также существует. Если изменяется электрическое поле $E = E(t)$, то вокруг его силовых линий возникает кольцевое магнитное поле H. Эти явления были предсказаны великим физиком-теоретиком Джеймсом Кларком Максвеллом в середине прошлого столетия. Максвелл вывел стройную систему уравнений, описывающих взаимосвязь переменных электрического и магнитного полей. Уравнения Максвелла и сейчас используются в электродинамике при расчетах антенн, волноводов, условий распространения радиоволн над земной поверхностью и решении многих других прикладных задач. Из этих уравнений Максвелла следует, в частности, существование электромагнитных волн, свободно распространяющихся в пространстве. Уравнения дают и скорость распространения этих волн, которая, как оказалось, совпадает со скоростью света.

Здесь просто необходимо сделать небольшое отступление. Скорость света к описываемому времени была известна уже достаточно точно. Впервые ее измерил датский астроном О. Ремер еще в 1675 году. Предвижу недоуменный вопрос читателей: а как ему это удалось в столь древние времена? Ремер наблюдал за затмениями спутников Юпитера. Еще непонятнее? Причем тут спутники Юпитера? Мне хочется описать эти наблюдения подробнее, чтобы читатель мог оценить остроту мысли и тонкость эксперимента ученых. Допустим, в какой-то момент Земля и Юпитер находятся по одну сторону от Солнца, т.е. максимально близко друг от друга. Астроном определяет момент, когда спутник Юпитера скрывается за планетой, а затем и период обращения спутника вокруг Юпитера. Небесные «часы» очень точны, а законы механики неизменны. Теперь можно рассчитать моменты заходов спутника за планету на много месяцев вперед. Сделаем эти расчеты и подождем. Через несколько месяцев Земля окажется в другом положении относительно Солнца, а Юпитер, обращающийся вокруг Солнца значительно медленнее, сдвинется от прежнего положения незначительно. Опять наблюдаем спутник и убеждаемся, что он «заходит» позже, чем было рассчитано! Чем это объяснить? Только тем, что Земля теперь

дальше от Юпитера и свету требуется некоторое время, чтобы преодолеть это дополнительное расстояние. Измерив запаздывание заходов спутника и оценив, насколько увеличилось расстояние, мы можем вычислить скорость света! Ремер получил значение 215 000 км/с.

Полвека спустя английский астроном Брэдли заметил, что видимое положение звезд на небесной сфере подвержено сезонным изменениям. Изменение невелико и может достигать 41 угловой секунды за полгода. Еще через полгода звезды возвращаются на прежнее место. Это явление называется звездной аберрацией. Разумно предположить, что звезды здесь ни при чем, а эффект имеет причиной вращение Земли вокруг Солнца. Вам случалось ехать в трамвае или автобусе в дождь? Замечали, что капли дождя оставляют на стекле не вертикальные, а наклонные дорожки? Простая векторная диаграмма объясняет почему так происходит. Чтобы найти угол наклона траектории капли на стекле, надо знать лишь скорость падения капли и скорость трамвая. То же и со светом. Падающая на Землю со скоростью c световая волна будет восприниматься с иного направления, если Земля движется со скоростью v. Знак отклонения изменяется на обратный через полгода, когда направление скорости Земли изменится на обратное. Скорость Земли на орбите хорошо известна из других астрономических наблюдений. Она составляет около 30 км/с. После продолжительных и тщательных наблюдений (обратите внимание, что работа должна была продолжаться несколько лет) Брэдли нашел скорость света, весьма близкую к истинной,– 303 000 км/с.

Как видим, все ранние попытки определения скорости света связаны с астрономическими наблюдениями. И эту информацию нам принес очень слабый, мерцающий и таинственный звездный свет! Но было интересно измерить скорость света и в наших, земных условиях. Впервые это сделал французский физик А. Физо в 1849 году. Его экспериментальную установку можно было бы назвать, пользуясь современной терминологией, светодальномером с механической модуляцией светового потока. Вкратце суть опыта состоя-



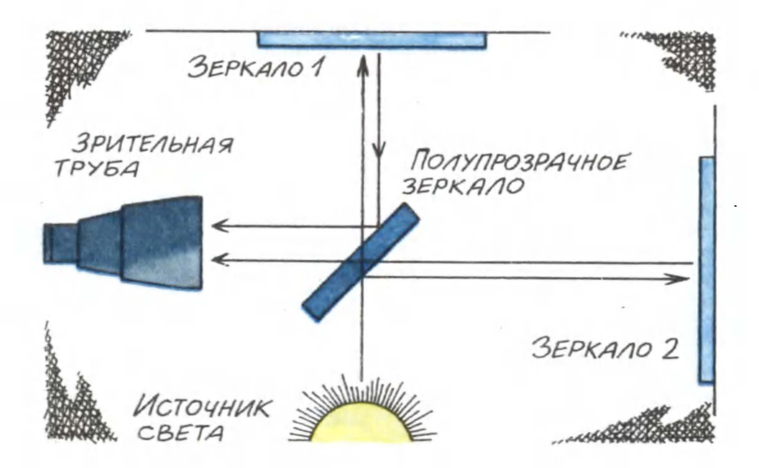
Абберация дождевых капель

ла в следующем. Свет лампы проходил сквозь зубья быстро вращающегося колеса и направлялся на удаленное зеркало. Расстояние до зеркала достигало 8,6 км! Отраженный от зеркала свет проходил сквозь те же зубья и наблюдался с помощью зрительной трубы. Мы не зря употребили термин «модуляция светового потока». Ведь зубчатое колесо превращало излучаемый световой поток в последовательность коротких световых импульсов. Если отраженный импульс приходил в тот момент, когда перед глазом наблюдателя располагался «зуб» вращающегося колеса, света не было видно. Стоило изменить скорость вращения колеса, и отраженные световые импульсы, проходя в промежутки между зубьями колеса, становились видимыми. Несложный расчет позволяет связать скорость света с числом зубьев колеса, скоростью его вращения и расстоянием до зеркала-отражателя. Физо получил значение скорости света 313 000 км/с.

Преемником Физо стал замечательный американский экспериментатор А. Майкельсон. Собственно, почти всю свою научную и практическую деятельность он посвятил одной цели – точному определению скорости света в различных условиях.

Майкельсон существенно усовершенствовал установку Физо и предложил много новых оригинальных приборов. С помощью оптического прибора – интерферометра, носящего теперь его имя, он сумел на коротких дистанциях измерить линейные перемещения с точностью до десятых долей микрометра. Опыты Майкельсона помогли решить многие фундаментальные вопросы физики. Было показано, например, что скорость света не зависит от скоростей источника или наблюдателя. Она всегда постоянна. Этот экспериментальный факт лег в основу теории относительности, разработанной Альбертом Эйнштейном.

Эксперименты А. Майкельсона в 1881 – 1887 годах произвели подлинную революцию в мышлении физиков. До того времени многие верили в существование некоего «эфира», колебания которого и являются световыми волнами. Ведь морские волны распространяются по поверхности воды, звуковые – в воздухе, жидких и



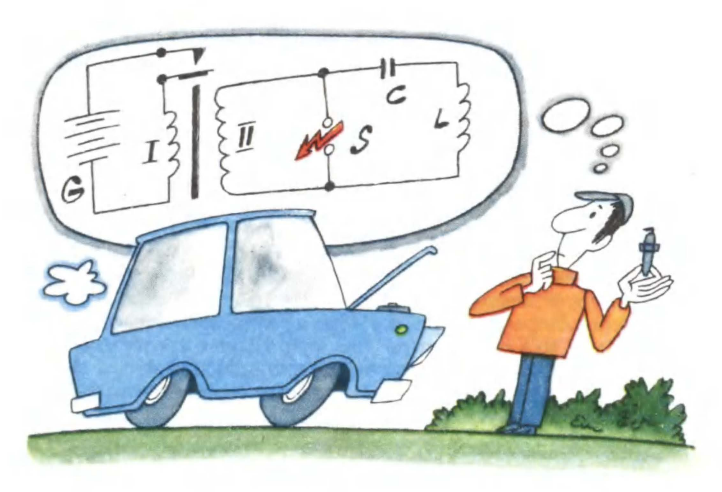
твердых средах. Казалось бы, и свет должен распространяться в какой-то среде. Но если это так, то Земля, вращаясь вокруг Солнца, должна двигаться сквозь эфир, на Земле должен дуть «эфирный ветер». Идея опыта Майкельсона была проста. Если одно плечо интерферометра расположить вдоль направления движения Земли, а другое поперек, то скорость света в плечах окажется разной. Повернув интерферометр на 90°, т.е. поменяв плечи местами по отношению к движению Земли, мы должны увидеть смещение интерференционных полос. Для повышения точности эксперимента была построена уникальная установка. На кирпичном фундаменте расположили кольцевой чугунный желоб, наполненный ртутью. В ртуть погружался кольцевой поплавок, повторяющий форму желоба, но не соприкасающийся с его стенками. На поплавок положили массивную каменную плиту, а на ней установили зеркала интерферометра. В каждом плече свет переотражался несколькими зеркалами, чтобы увеличить действующую длину плеч (примерно до 11 м). Установка позволяла очень плавно, без толчков и вибраций поворачивать интерферометр. Чувствительность прибора в 40 раз превосходила требуемую для обнаружения «эфирного ветра». И что же? Как бы ни поворачивали интерферометр, в какое бы время суток или года ни проводили измерения, никакого смещения интерференционных полос обнаружено не было. Значит ... значит, нет и «мирового эфира», а скорость света не зависит от движения самой установки.

В 1932 году для точного измерения скорости света в вакууме Майкельсон произвел еще один уникальный опыт. Свет заставили распространяться в трубе длиной 1,6 км, из которой откачали воздух. Измерения проводили с помощью вращающейся призмы, осуществлявшей механическую модуляцию светового потока.

Точность измерения скорости света в опытах Майкельсона достигла 1 км/с. Великие экспериментаторы уходят, но проблемы остаются. Совсем недавно, в 60-х годах нашего столетия на Луну с помощью ракеты был доставлен зеркальный лазерный отражатель. С Земли навели на него лазерный светодальномер, уже не с механической, а с электронной модуляцией светового потока. Светодальномер обеспечил поразительную точность измерения запаздывания отраженного светового сигнала (как известно, расстояние от Земли до Луны составляет 380 000 км, а запаздывание отраженного сигнала достигает 2,5 с). Этот совместный советско-французский эксперимент нужен был для особо точного измерения астрономических расстояний. И что же? Возможности прибора полностью реализованы не были. Оказалось, что мы недостаточно точно знаем скорость света, чтобы вычислить искомое расстояние! Срочно несколько научных лабораторий мира взялись за решение проблемы. Было предложено использовать независимые измерения частоты и длины волны лазерного излучения, а затем вычислить скорость света по известной формуле $c = \lambda f$. В Новосибирском институте физики полупроводников придумали способ стабилизации частоты газового лазера с точностью до 10^{-12}. В лабораториях Национального бюро стандартов и Массачусетсского технологического института США с помощью ряда хитроумных преобразований частоту излучения лазера измерили электронным цифровым частотомером. Длина волны измерялась прецизионным оптическим интерферометром. В результате теперь мы знаем скорость света с точностью до $3 \cdot 10^{-9}$. Она составляет 299 792 458 $\pm$ 1 м/с. Хорошо, что за время этих исследований уголковому отражателю на Луне ровным счетом ничего не сделалось – ведь он представляет собой конструкцию из металлических зеркал.

Но вернемся к великим теоретикам и практикам прошлого века. Убедившись, что скорость электромагнитных волн близка к скорости света, в 1864 году Максвелл высказал смелое и блестяще подтвердившееся предположение, что свет есть электромагнитная волна. С помощью интерферометров определили и длины световых волн, лежащие от 0,4 мкм (синий свет) до 0,7 мкм (красный свет). Но кроме световых должны существовать и другие электромагнитные волны. Известно было о существовании более коротких, ультрафиолетовых волн. Еще в начале XIX века открыли инфракрасные волны. Предстояло экспериментально обнаружить еще более длинные электромагнитные волны, которые теперь называют радиоволнами. Их обнаружили опытным путем через 20 лет после предсказания Максвелла.

В 1886–1889-х годах Генрих Герц построил искровой генератор электромагнитных волн и исследовал их свойства. Устройство искрового генератора заслуживает более подробного описания. Основа его – колебательный контур, известный нам из предыдущей главы. Но колебания в реальном контуре быстро затухают, и, чтобы поддерживать серию колебаний, надо снова и снова заряжать конденсатор и переключать его от источника напряжения к катушке. Этим быстродействующим коммутатором и служит искровой промежуток между двумя металлическими шариками. Искру дает индукционная катушка, или катушка Румкорфа. Сейчас мало кто знает, что это такое, и тем более плохо представляет себе устройство индукционной катушки. А ведь более полувека она была одним из наиболее распространенных устройств в электротехнике. (Разновидность индукционной катушки и до сих пор используется в системах зажигания автомобилей.) Ток батареи G, проходя через первичную обмотку индукционной катушки, намагничивает ее железный сердечник, который притягивает подвижный контакт, и цепь разрывается. Магнитное поле исчезает, и контакт замыкается снова. Частота прерываний тока невелика и составляет $10^2 \ldots 10^3$ раз в секунду. Но самое интересное происходит в момент размыкания цепи. В об-



Возбуждение колебаний индукционной катушкой

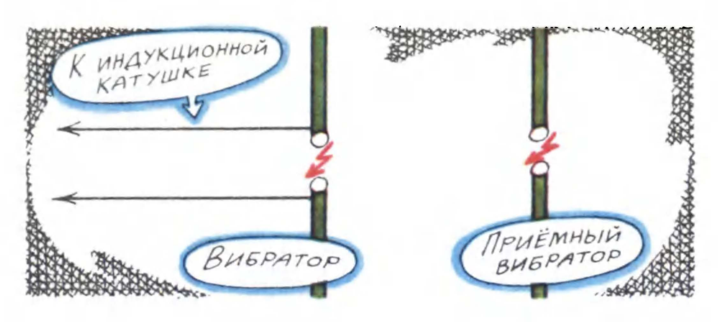
мотках индукционной катушки возникает ЭДС самоиндукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока. Эта скорость очень велика, ведь контакты размыкаются практически мгновенно. В результате в момент размыкания на выводах первичной обмотки возникает импульс напряжения, в несколько десятков раз превышающий напряжение батареи! Например, при напряжении батареи 12 В несложно получить импульс напряжения 300...400 В. Вторичная обмотка содержит гораздо больше витков, и импульс напряжения на ее выводах может достигать нескольких тысяч вольт или даже десятков киловольт. До такого же напряжения заряжается и конденсатор контура *C*. Искровой промежуток *S* регулируют так, чтобы он пробивался при напряжении, близком к максимальному, развиваемому индукционной катушкой. Проскочившая искра замыкает цепь колебательного *LC*-контура, и в нем возникает серия затухающих колебаний.

Итак, индукционная катушка позволила возбуждать серии затухаюших колебаний высокой частоты. Но как же излучить их в пространство в виде волн? Генрих Герц полагал, как это и следует из уравнений Максвелла, что чем быстрее изменяются электрические и магнитные поля, тем эффективнее излучаются волны. Стремясь повысить частоту колебаний контура, Герц оставил в катушке контура всего один виток, а площадь пластин конденсатора уменьшил до предела. В результате получился вибратор, состоящий из двух стерженьков с искровым промежутком между ними. Оказалось, что вибратор Герца эффективно излучает волны с длиной, равной удвоенной длине вибратора. Теперь-то мы знаем, что вибратор Герца представляет собой обычный полуволновый диполь. Посмотрите на любую крышу, и вы увидите телевизионные антенны, представляющие собой систему диполей.

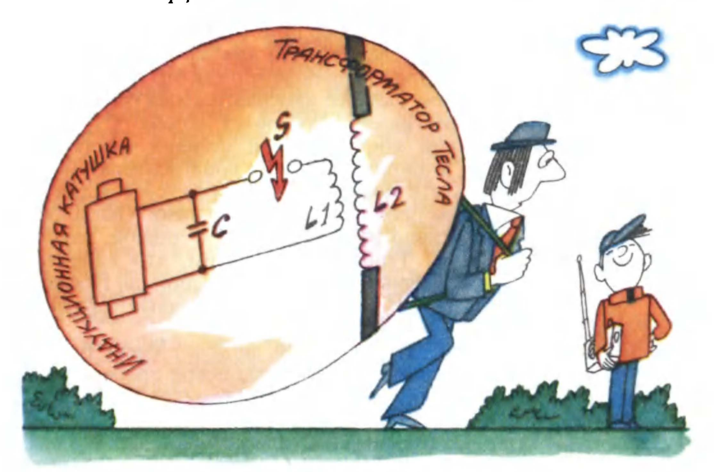
Приемником колебаний служил другой диполь с очень близко расположенными шариками разрядника. Когда искра проскакивала в передающем диполе, крошечную искру можно было наблюдать и в приемном! Так экспериментально была осуществлена передача электромагнитных волн радиодиапазона на расстояние в несколько метров. Оказалось, что прием наиболее эффективен, когда приемный вибратор настроен в резонанс с передающим. Длины вибраторов при этом одинаковы.

Опыты Герца, выполненные в 1887–1888-х годах, вызвали огромный интерес у физиков и инженеров. Многие стали их повторять, видоизменять и совершенствовать. П. Н. Лебедев, замечательный русский физик, открывший, в частности, давление света, сконструировал вибратор на длины волн до трех сантиметров (в опытах Герца длина волны составляла около трех метров). Это были совсем крошечные вибраторы! Были исследованы явления отражения и преломления электромагнитных волн на границе раздела различных сред. Наблюдали отражение волн от металлического листа, преломление волн призмой, изготовленной из диэлектрика. Значительно более мощные электромагнитные колебания, но меньшей частоты позволил получить трансформатор Тесла, вторичная обмотка которого *L2* была настроена в резонанс с первичной *L1*. Поскольку конденсатор во вторичной обмотке отсутствовал, число витков ее было значительно больше, чем в первичной, что обеспечивало на вибраторе напряжения до миллиона вольт!

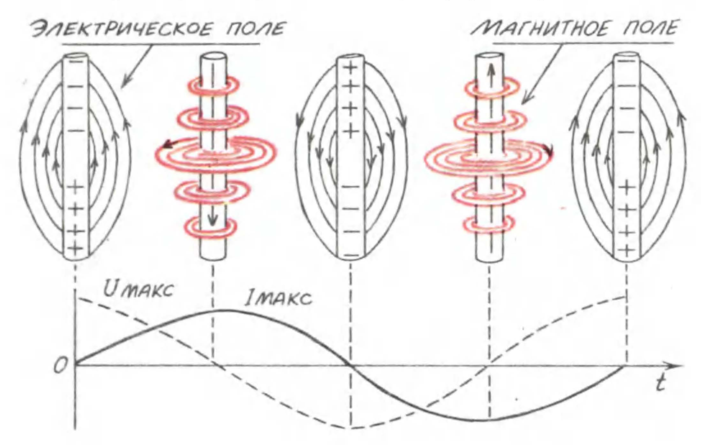
Наконец мы вплотную подошли в нашем рассказе к моменту изобретения радио. Разумеется, вы знаете, кто это сделал. Наш соотечественник, преподаватель физики минных офицерских классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. Ему удалось скон-



Опыт Герца



Искровой радиопередатчик с трансформатором Тесла

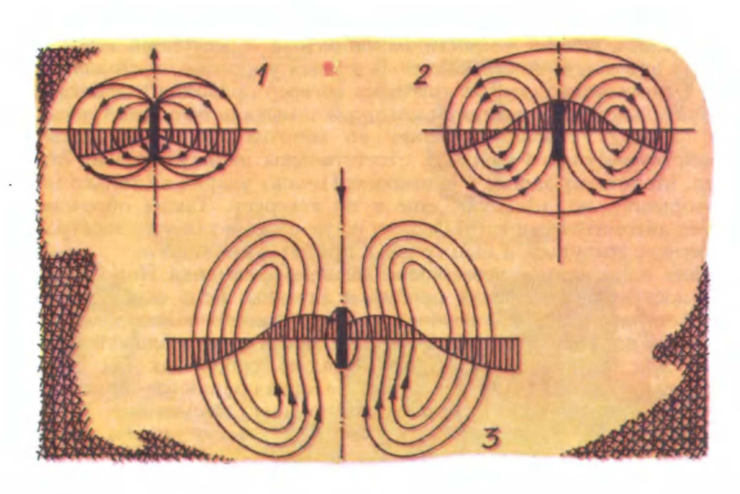


Колебания в вибраторе Герца

струировать приемник электромагнитных волн, обладающий достаточной для практических целей чувствительностью. Вспомним приемный вибратор Герца. Для того чтобы в его разряднике проскочила искра, необходимо, чтобы электромагнитная волна развила в нем напряжение в несколько сотен вольт. А это значит, что напряженность поля электромагнитной волны должна быть также около сотен вольт на метр (ведь длина вибратора была близка к 1 м). Напряжение в вибраторе рассчитать очень просто: надо напряженность электрического поля волны помножить на эффективную (действующую) длину вибратора. Обычно она составляет приблизительно 0,7 геометрической длины вибратора.

Столь сильные поля создают лишь близкие разряды молний. Однажды я неторопливо отсоединял от своего любительского передатчика фидер антенны, любуясь в окно красивой грозовой тучей. В туче сверкнула молния, и в тот же миг между выводами антенны и заземления, находившимися у меня в руках, проскочила с сухим треском голубоватая искра длиной в несколько сантиметров! Хорошо, что выводы были с толстой изоляцией. Дрожащими руками я все-таки соединил эти выводы, заземлив антенну, и стал вспоминать Г. В. Рихмана, сподвижника М. В. Ломоносова, погибшего во время грозы при опытах с металлическим стержнем на крыше (впоследствии этот стержень, только заземленный, стали называть громоотводом). С тех пор я всегда отключаю антенну задолго до приближения грозы, хотя все конструкции моих антенн имеют надежную грозозащиту.

Но вернемся к приемнику А. С. Попова. Вместо искрового промежутка в приемном вибраторе Попов использовал когерер, прибор, изобретенный незадолго до этого французом Э. Бранли. Когерер представлял собой стеклянную трубку с двумя выводами, между которыми были насыпаны железные опилки. Из-за тончайшего слоя окиси на поверхности опилок сопротивление когерера



Излучение волн вибратором Герца (показана конфигурация силовых линий электрического поля в моменты 1–3, следующие через четверть периода)



Антенна радиостанции, выполненная в виде вертикальной мачты длиной в четверть волны (электрические силовые линии замыкаются на землю, магнитные – образуют кольца вокруг мачты)

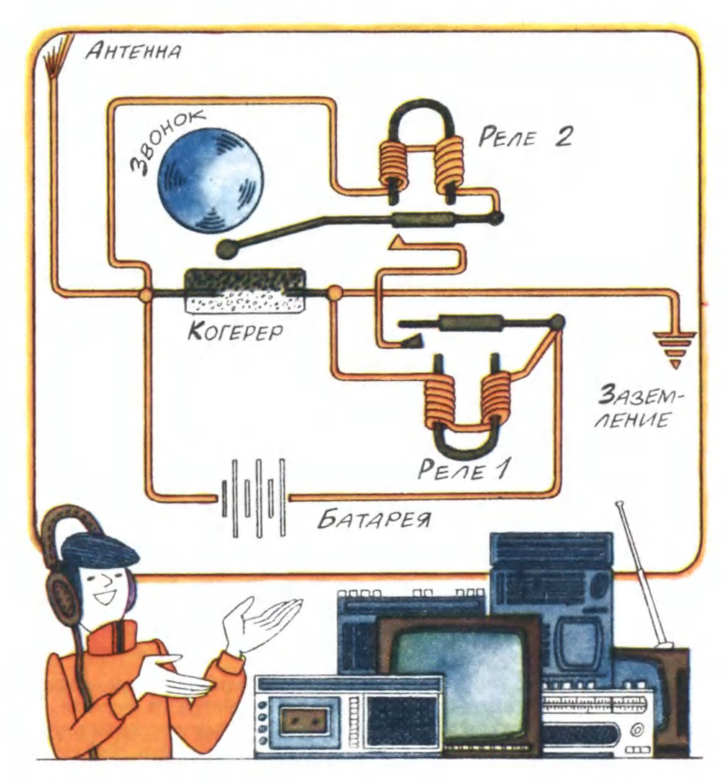
велико, но лишь до тех пор, пока на его выводах отсутствует напряжение, безразлично, переменного или постоянного тока. Как только прикладывается напряжение, наведенное электромагнитной волной, сопротивление когерера резко падает. Это объясняется действием мельчайших искр, пробивающих слой окиси между опилками и как бы сваривающих опилки между собой. Чтобы разрушить образовавшиеся мостики для электрического тока, когерер достаточно было встряхнуть. К когереру подводились колебания, наведенные принимаемой волной в приемном вибраторе. Следующий важный элемент приемника А. С. Попова – релейный усилитель постоянного тока. Относительно слабый ток через когерер приводил в действие чувствительное реле, контакты которого замыкали цепь электрического звонка. Устройство звонка во многом было аналогично устройству катушки Румкорфа, отсутствовала лишь вторичная обмотка. Молоточек звонка в приемнике Попова ударял не только по колокольчику, но, отскочив, еще и по когереру. Таким образом, когерер автоматически встряхивался после приема каждого электромагнитного импульса и был готов к приему следующего.

Еще одно важное усовершенствование приемника Попова заключалось в использовании приемной антенны. Ведь чем длиннее провод антенны, тем большее напряжение наводит в нем электромагнитная волна. Проволочная антенна, протянутая к ближайшему дереву или на крышу дома, представляет собой как бы одну половину вибратора Герца. Но нужна и вторая половинка – противовес. Роль противовеса с успехом выполняет заземление. Токи, которые должны были бы течь в противовес, могут просто растекаться по поверхности и в толще земли, ведь обычная, достаточно влажная почва неплохо проводит электрический ток.

Наконец приемник был готов. Но еще не было передатчика! Можно было принимать лишь радиосигналы естественного происхождения. Они генерируются при каждом разряде молнии, ведь

молния представляет собой гигантскую искру, а канал ионизированного газа, образующийся при разряде, прекрасно проводит электрический ток и служит передающим вибратором. А.С. Попов назвал свой приемник грозоотметчиком. С подключенной наружной антенной удавалось регистрировать грозы на расстояниях до 30 км. Каждый разряд молнии сопровождался коротким треньканьем звонка в приемнике! Это устройство А.С. Попов продемонстрировал 7 мая 1895 года на заседании Русского физико-химического общества. Начиная с 1945 года ежегодно 7 мая отмечается как день рождения радио.

Опыты продолжались. Интересно было принимать искусственно создаваемые сигналы. Искровой передатчик тоже совершенствовался: к нему присоединили антенну, что значительно увеличило длину вибратора. Передачи стали осуществляться на более длинных волнах. К радиоприемнику был присоединен телеграфный аппарат. И вот 24 марта 1896 года были продемонстрированы передача и прием сигналов азбуки Морзе с записью на ленту телеграфного аппарата. Адмирал С.О. Макаров заинтересовался опытами А.С. Попова и оказал изобретателю большую помощь. В результате весной 1897 года была передана первая радиограмма с корабля на берег, уже на расстояние 640 м.



Первый радиоприемник А.С. Попова

Успешные опыты по радиосвязи проводились и за границей. Здесь надо упомянуть прежде всего талантливого итальянского инженера Г. Маркони, с огромной энергией внедрявшего достижения радиосвязи в практику. В 1897 году он получил в Великобритании патент на «способ сигнализации на расстоянии» и организовал компанию, в настоящее время носящую его имя. Обладая миллионными капиталами, компания развернула широкое производство радиотелеграфных аппаратов и приступила к осуществлению проекта трансокеанской связи между Европой и Америкой. В то же время на прошение А.С. Попова о выделении трехсот рублей на опыты царский морской министр наложил резолюцию: «На такую химеру денег отпускать не разрешаю!»

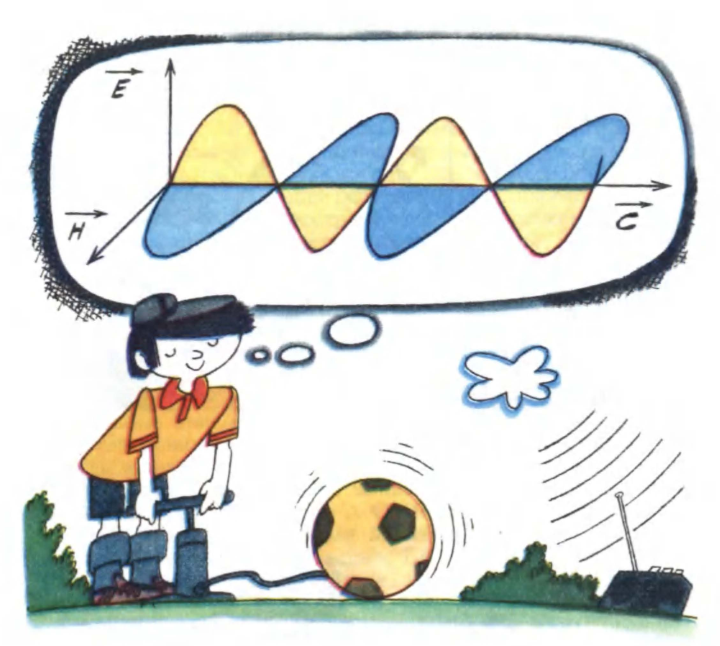
В процессе экспериментов была открыта возможность слухового приема на «телефонные трубки», как тогда называли обычные наушники. Дальность связи резко возросла, и все большее число людей проникались мыслью о широком практическом использовании нового изобретения.

«Не было бы счастья, да несчастье помогло»,– говорит русская пословица. Ноябрьской ночью 1899 года в кромешной темноте, во время снежного шторма, не имея ни малейшей возможности определить свое местонахождение (радионавигационных приборов, разумеется, еще не было), новый, только что построенный броненосец «Генерал-адмирал Апраксин» оказался на камнях у пустынного острова Гогланд в Финском заливе. Надо было срочно организовать спасательные работы, а для этого нужна связь. И А.С. Попов со своим постоянным помощником П.Н. Рыбкиным решили эту проблему. Одна станция была установлена на острове, другая – на материке, вблизи финского города Котка. Длина линии связи достигла 44 км! Связь бесперебойно действовала по апрель 1900 года, пока велись спасательные работы. А 6 февраля этого же года радио спасло жизнь 27 рыбакам, которые оказались в открытом море на льдине, оторвавшейся от берегового припая. Сейчас бы, как это случилось в январе 1987 года на Рижском заливе, вызвали спасательные вертолеты. В 1900 году их не было, но зато было радио! «Командиру «Ермака». Около Лавенсаари оторвало льдину с рыбаками. Окажите помощь» – вот текст радиограммы, принятой П.Н. Рыбкиным на острове Гогланд. Ледокол «Ермак» немедленно вышел в море, разыскал льдину с рыбаками и спас людей. Так описывают первый случай, когда радио сохранило жизнь людям. С тех пор подобных случаев было множество. Спустя двенадцать лет только благодаря радио была спасена часть пассажиров печально известного океанского лайнера «Титаник».

Но пожалуй, пора отвлечься от истории радиотехники – она столь обширна и увлекательна, что ей следовало бы посвятить отдельную книгу, и пойдем дальше.

Распространение радиоволн над земной поверхностью

Рассмотрим, как же распространяются радиоволны – электромагнитные волны длиной более долей миллиметра. В пустоте, в открытом космосе электромагнитная волна распространяется прямолинейно, причем направление вектора напряженности электрического поля $\bar{E}$ перпендикулярно направлению распространения $\bar{c}$. Вектор магнитного поля $\bar{H}$ также перпендикулярен вектору $\bar{c}$ и



Структура электромагнитной волны

одновременно вектору $\bar{E}$. Все три вектора образуют правовинтовую систему. Если излучатель волн изотропный, т. е. всенаправленный, то и волны распространяются во все стороны от него. Бросьте камень в пруд. И вы увидите волны, расходящиеся правильными концентричными окружностями. Объяснить это явление можно тем, что скорость распространения волн на поверхности воды, так же как и радиоволн в открытом пространстве, одинакова во всех направлениях.

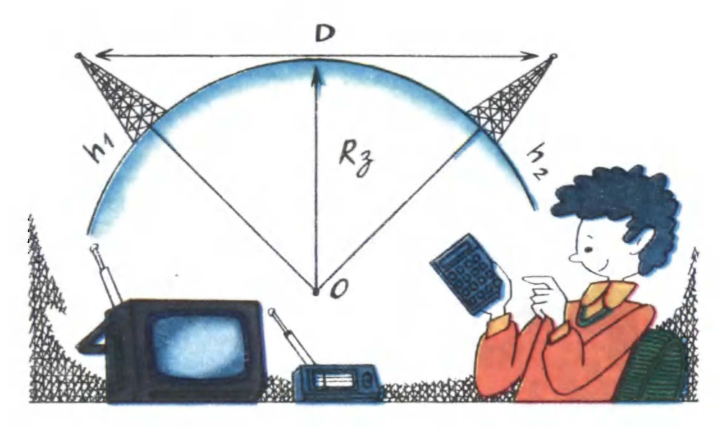
Как обстоит дело в земных условиях? Здесь даже аналогию придумать трудно, ведь Земля имеет форму шара. Согласитесь, нелегко представить себе шарообразный пруд. Если бы не было атмосферы, радиоволны из любой точки распространялись бы по касательной к поверхности. Связь можно было бы осуществить только в пределах прямой видимости между мачтами антенн. Это расстояние не так уж и мало. Читатели, достаточно сведущие в геометрии, легко решат задачу о дальности прямой видимости между двумя возвышенными точками. Мы же просто приведем готовую формулу

$$D = \sqrt{2R_з}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

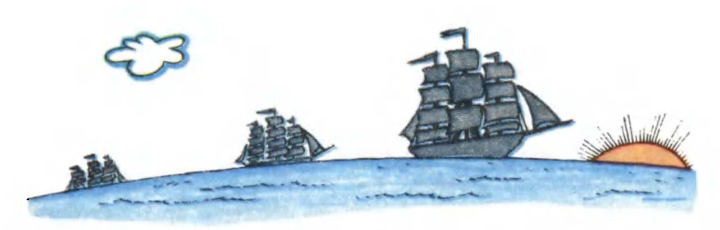
где $R_з$ – радиус Земли; h_1 и h_2 – высоты мачт антенн.

Как видим, дальность пропорциональна корню квадратному из высоты мачты антенны. Например, два человека среднего роста на идеальной сферической Земле видят друг друга на расстоянии 8 км.

4–647



Определение дальности прямой видимости



Так появляется корабль из-за горизонта

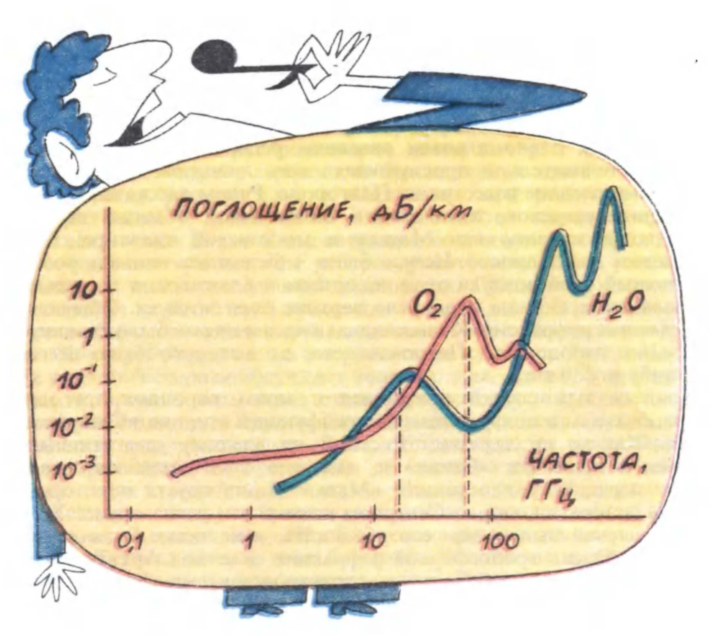
Заметим, что они видят только головы друг друга, а туловище и ноги надежно скрыты за горизонтом! Идеальную сферическую поверхность можно найти только в море, и моряки отлично знают этот эффект: сначала из-за горизонта показываются только верхушки мачт встречного корабля, видимая их часть все увеличивается по мере сближения кораблей, и уже в последнюю очередь видны корпус и палубы.

Мы сейчас упомянули о распространении электромагнитных волн оптического диапазона – световых волнах. Ведь только благодаря световым волнам мы видим то, что мы видим. Почти так же, как световые, распространяются и более длинные инфракрасные волны и еще более длинные миллиметровые и сантиметровые волны. Но здесь необходимо сделать ряд оговорок. Атмосфера может сильно поглощать некоторые волны с определенными длинами. Действует уже знакомое нам явление резонанса. Молекулы газов атмосферы ведут себя в поле электромагнитной волны как электрические диполи. А если диполь настроен в резонанс с частотой воздействующей на него волны, то он начинает интенсивно возбуждаться. Атомы в молекуле приходят в колебательное движение, а энергия волны, естественно, расходуется на возбуждение этих колебаний. Кислород интенсивно поглощает излучение с длинами волн около 0,5 см, а водяной пар – 1,35 см. На более коротких, субмил-

лиметровых волнах находятся линии поглощения большинства атмосферных газов, и условия распространения этих волн весьма неблагоприятны. Зато для более длинных волн, сантиметровых, дециметровых и метровых, атмосфера практически прозрачна. Все эти диапазоны относят к ультракоротким волнам (УКВ). Даже сильный дождь поглощает лишь самые короткие сантиметровые волны, тогда как более длинные волны УКВ диапазона хорошо распространяются в любую погоду.

На Останкинской башне размещены антенны Московского телецентра. Ведь УКВ распространяются прямолинейно, а с высокой башни телевизионный передатчик, работающий в диапазоне УКВ, освещает бóльшую территорию. Были проекты размещения телевизионных антенн и на аэростатах, и на самолетах. Вот на создание каких проектов вынуждает нас кривизна поверхности Земли. В последние годы проблему предлагают решить еще радикальнее – установить телевизионные передатчики на искусственных спутниках Земли. Собственно, передачи со спутников уже давно ведутся. Только для их приема нужны достаточно большие антенны и специальные приемники. Но теперь наступает новая эра – эта прямого телевизионного вещания со спутников, – когда каждый телезритель, направив антенну в небо, сможет принимать телепередачи в любой точке страны. Здесь не лишне заметить, что впервые подняли антенну на воздушном шаре А. С. Попов и П. Н. Рыбкин!

Итак, с ультракороткими волнами, вроде бы, все ясно: они распространяются прямолинейно. Но нет правил без исключения. По мере развития радиотехники все чаще стали рассказывать о



Поглощение сантиметровых и миллиметровых волн в атмосфере

случаях, казалось бы, просто невозможных. Сигнал УКВ передатчика принимается далеко за горизонтом, почему, в чем дело? Уж не погода ли влияет? А погода неважная – сыро, холодно и туман. Но синоптики предсказывают скорое прохождение теплого фронта, и небо уже затягивают слоисто-кучевые облака. Это значит, что на некоторой высоте над поверхностью Земли поверх сырого, холодного и тяжелого воздуха растекается подошедший слой теплого воздуха. Хотя показатель преломления воздуха и невелик, около 1,0003, он все-таки заставляет радиолуч слегка преломиться. А если изменение показателя преломления с высотой достигает 157 миллионных долей единицы на километр высоты, радиус кривизны радиолуча становится равным радиусу Земли и волна как бы огибает шарообразную Землю. Такие условия складываются нечасто и преимущественно в такую погоду, как мы только что описали. Холодный и влажный воздух у поверхности имеет большой индекс преломления, а теплый и сухой воздух на высоте – малый. Любая волна всегда преломляется в сторону среды с бóльшим индексом. Явление преломления электромагнитных волн в атмосфере называется рефракцией. Она наблюдается и в оптическом диапазоне – заходящее Солнце мы видим еще несколько минут после того, как оно скроется за горизонтом. Были случаи (совсем уж редкие), когда с Южного берега Крыма видели турецкие горы! В УКВ диапазоне рефракция случается гораздо чаще. Для ее возникновения достаточно даже легкого, росистого летнего утра.

Хорошо помню, как именно в такое утро, поеживаясь от еще не ушедшей ночной прохлады, я вылез из палатки, стоящей на берегу Онежского озера, около Вытегры, и включил приемник. Было 25 июня 1979 года. Не сразу сообразив, что делаю, я включил УКВ диапазон и настроился на ленинградскую станцию. Послушал, какая там погода, какие фильмы и концерты ожидаются вечером. Наконец, вспомнил, что до Ленинграда больше четырехсот километров и попасть туда вечером совершенно нереально. Но что самое главное, УКВ сигналы не должны были бы приходить оттуда! Уяснив себе, что столкнулся с аномальным явлением распространения радиоволн, стал внимательно прослушивать весь диапазон. И что же? Передают последние известия из Новгорода. Рядом рассказывают о достижениях сельского хозяйства в Вологодской области. А уж Петрозаводск слышно как Москву в московской квартире! Все объяснилось очень просто. Ночью было + 5°, выпала сильная роса, и приземный слой воздуха стал холодным и влажным, в то время как восходящее Солнце подогрело верхние слои воздуха. Обычная тропосферная рефракция! К одиннадцати часам дня не было слышно ни дальних городов, ни Петрозаводска, до которого было всего каких-нибудь 150 км.

Аналогичный случай произошел с моим хорошим другом, радиолюбителем и полярником, на дрейфующей станции «Северный полюс». Как-то он захватил с собой на зимовку портативный батарейный приемник «Океан» и, включив УКВ диапазон, стал слушать передачу радиостанции «Маяк». Лишь спустя некоторое время он сообразил, что на Северном полюсе это невозможно! Тем не менее случай был, и чем его объяснить, я не знаю. Возможно, обширная область тропосферной рефракции охватила Арктику или очень сильно возросла концентрация электронов в ионосфере в связи с магнитной бурей или полярным сиянием и ультракороткие волны отражались от ионосферы так же, как короткие.

С другими аномальными случаями распространения УКВ мы еще встретимся, а пока перейдем к диапазону радиоволн с длинами от нескольких километров до десяти метров.

Дневные и ночные волны

Еще в первых опытах А. С. Попова и других изобретателей было установлено, что чем больше размеры антенн, тем больше и дальность связи. Ведь, как мы уже знаем, рабочая частота первых, простейших передатчиков определялась единственным колебательным контуром, в который входила и антенна. Были и теоретические соображения в пользу сверхдлинных волн, которые должны были огибать выпуклость земной поверхности за счет известного из оптики явления – дифракции.

Дифракция – это огибание волной препятствий. Какие препятствия огибает световая волна? Представим, что «точечный» источник света создает на удаленном экране тень от черного картонного кружка. Четкая тень видна от кружка большого диаметра. А при уменьшении диаметра тень становится размытой, более того, наступает момент, когда вместо минимума освещенности в середине тени появляется светлое пятно! Другой опыт. Проделаем небольшое отверстие в непрозрачном кружке. Казалось бы, что чем меньше отверстие, тем меньше должно быть светлое пятно на экране. Это верно до определенных пределов. Если же отверстие становится совсем маленьким, освещенная зона на экране расширяется до огромных размеров! Начало объяснению дифракции положил еще Х. Гюйгенс в «Трактате о Свете». Он выдвинул принцип, согласно которому каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны. Если фронт волны достаточно широк, то волны отдельных источников складываются в направлении «вперед» и взаимно «гасят» друг друга в направлении «вбок» или «в сторону». Таким образом, принцип Гюйгенса не противоречит прямолинейности распространения света. Если же от фронта волны осталась одна точка, как в случае чрезвычайно малого отверстия, свет за отверстием распространяется во все стороны.

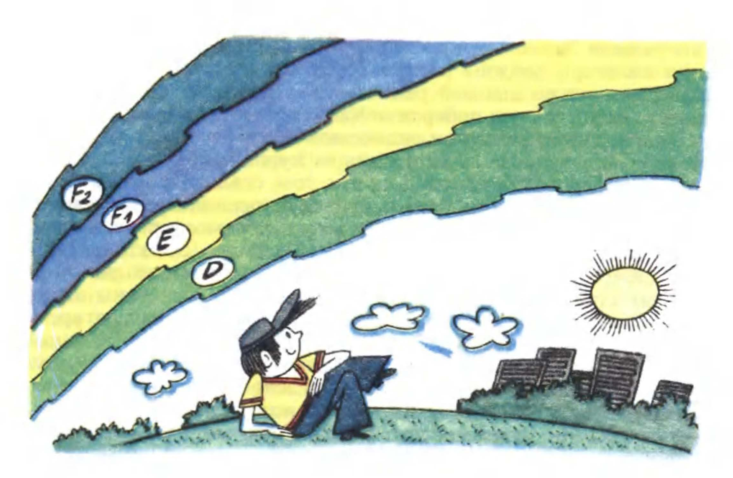
Для сверхдлинных радиоволн, длина которых составляет несколько километров, выпуклость Земли при не слишком больших расстояниях уже не помеха. Например, при расстоянии между передатчиком и приемником 1000 км высота шарового сегмента составит около 20 км. Следовательно, волны с частотами в десятки и сотни килогерц должны распространяться на такие расстояния. Начались опыты по дальней радиосвязи. Гигантские антенны, построенные на восточном побережье Канады и в Англии, обеспечили успех – была проведена первая радиосвязь через Атлантический океан. Доктор Фредериксон в американском журнале «Труды Института радиоинженеров» обсуждает вопрос о том, сколько каналов связи можно организовать через океан, приводит осциллограммы телеграфных сигналов, с трудом различимых среди атмосферных помех. Каналов получается мало – ведь избирательность (селективность), т. е. способность отстраиваться от соседних по частоте сигналов мешающих станций, крайне низка. Частоты станций должны отличаться друг от друга процентов на десять, делает вывод автор, а тогда в диапазоне 30...100 кГц можно разместить всего 12 каналов... Техника начала века большего не позволяла. Но в другом отношении результаты поразительны. Распространение волн на расстояние в 5...10 000 км уже нельзя объяснить дифракцией. Должен существовать какой-то другой механизм их дальнего прохождения.

А чем объяснить, что днем дальность связи намного меньше, чем ночью? Маркони проводит массу опытов, конструирует направ-

ленную антенну, но факт остается фактом: днем волны почему-то поглощаются, а ночью – нет.

В 1902 году физики А. Кенелли и О. Хевисайд высказали смелое предположение: верхние слои атмосферы должны состоять из ионизированного газа – ведь они подвергаются прямому воздействию солнечного ультрафиолета и других жестких космических излучений. Ионизированный газ проводит электрический ток, а проводники отражают электромагнитные волны. Следовательно, радиоволны должны отражаться от верхних слоев атмосферы! Гипотеза вызвала много споров, окончательно затихнувших лишь в 1925 году, когда американские инженеры Г. Брейт и М. Туве послали импульсный радиосигнал вертикально вверх, приняли отраженный сигнал и экспериментально определили высоту отражающего слоя. Долгое время ионосферу так и называли – слой Хевисайда, пока ... пока не выяснилось, что отражающих слоев несколько: летним днем их не меньше четырех!

Оказывается, один ионизированный слой образовался бы, если бы атмосфера была однородной и имела одинаковую температуру на всех высотах. В действительности же состав верхних слоев атмосферы весьма неоднороден, и, кроме того, наблюдается несколько температурных инверсий (отклонений от нормального закона убывания температуры с высотой). Ближе всего к поверхности Земли на высоте около 70 км расположен слой *D*. Это нерегулярное образование ионосферы существует только в дневные часы, когда велика интенсивность солнечного ионизирующего излучения. На высотах 100...120 км постоянно существует слой *E*. В зависимости от времени суток и года изменяется лишь концентрация свободных электронов в этом слое. Ночью слой располагается несколько выше, а днем – ниже, что также связано с изменениями потока ионизирующего излучения. Самый верхний слой, слой *F*, располагается на высотах 150...350 км, где и атмосферы-то уже практически нет, настолько разрежен воздух на этих высотах. Молекулы газов, составляющих атмосферу, там распадаются на отдельные атомы, которые под действием ионизирующего излучения немедленно те-

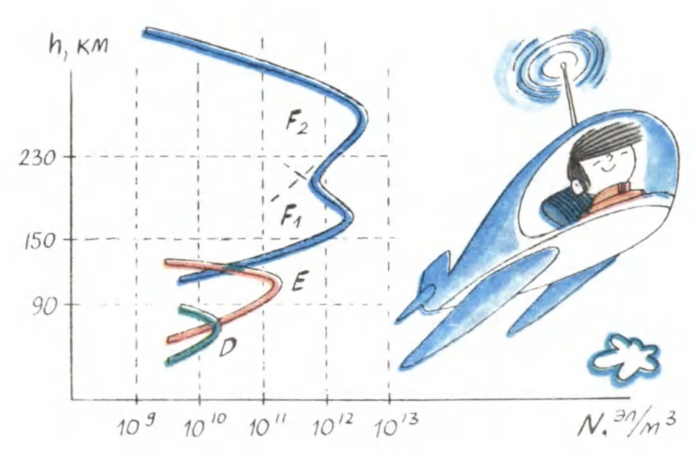


Ионосфера Земли

ряют внешние, наиболее удаленные от ядра электроны и становятся положительно заряженными ионами. А потерянные ими электроны становятся свободными и с огромными скоростями летают в верхних слоях атмосферы, пока не столкнутся с каким-либо положительным ионом. Путь, проходимый любой частицей между двумя столкновениями, называют длиной свободного пробега. В верхних слоях, где частиц мало, длина свободного пробега может быть очень большой. Процесс воссоединения электрона с ионом называется рекомбинацией. Таким образом, содержание заряженных частиц в атмосфере определяется двумя процессами: ионизацией внешним излучением и рекомбинацией из-за соударений. Теперь становится понятным, почему ионизированных атомов и молекул почти нет у поверхности Земли: поток ионизирующего излучения здесь очень мал, поскольку он уже поглотился в верхней атмосфере, а соударения очень часты и рекомбинация ионов и электронов происходит немедленно. В верхних слоях все наоборот: поток ионизирующего излучения велик, а столкновения, приводящие к рекомбинации, относительно редки. Вот поэтому практически все атомы в самых верхних слоях ионосферы ионизированы.

Днем слой F распадается на два: F_1 и F_2. Слой F_1, расположенный ниже, обусловлен ионизацией молекулярного азота, а слой F_2 – ионизацией атомарного кислорода. Ночью слой F_1 исчезает вследствие рекомбинации пар электрон – ион, а слой F_2 сохраняется, хотя концентрация электронов в нем значительно уменьшается. На приводимом рисунке показаны примерные графики, связывающие электронную концентрацию (число электронов в единице объема) с высотой. Не следует думать, что об ионосфере Земли уже все известно. В смысле познания Вселенная неисчерпаема, и она преподносит нам все новые и новые сюрпризы. Один из таких сюрпризов положил конец увлечению сверхдлинными волнами в радиотехнике.

На свете есть неугомонные люди, отдающие очень много времени и средств любимому увлечению. Таковы радиолюбители. Как только широкой публике стали известны опыты по передаче и приему радиосигналов, во многих крупных городах были построены



Концентрация электронов в ионосфере

служебные радиостанции, радиопередатчики стали устанавливать на морских судах, появились и радиолюбители. «Чудо» радиоволн не давало им покоя. Из подручных материалов, проявляя массу изобретательности, они строили радиоприемники и слушали, слушали таинственные шорохи и трески эфира, слабые сигналы дальних радиостанций. Попытались сделать и собственные радиопередатчики. Мимо этого факта уже не могли пройти государственные службы радиосвязи – возможны были взаимные помехи. Диапазон сверхдлинных волн, как мы уже говорили, вмещает немного каналов, и он был отведен служебным станциям, а радиолюбителям отдали диапазон коротких волн (короче 200 м), как никому не нужный. Разумеется, радиолюбители не могли строить сверхмощные передатчики – мощность в несколько ватт, подводимая к антенне, считалась вполне приличной. Устанавливались связи земной или, как ее еще называют, поверхностной волной в пределах прямой видимости, на расстояниях максимум несколько десятков километров. И вдруг ... в конце 1923 года два радиолюбителя установили связь между Англией и Америкой! Сообщение об этом вызвало буквально переворот в умах специалистов. В 1924 году Г. Маркони уже настоятельно рекомендует использовать для дальней связи короткие волны. В том же году радиолюбители, работая на маломощных передатчиках, установили связь между Англией и Новой Зеландией. Но Англия и Новая Зеландия почти антиподы! Значит ... значит, на коротких волнах (КВ) возможна радиосвязь с любой точкой земного шара! Вот вам и ненужные короткие волны! Теперь в реальности существования ионосферы отпали всякие сомнения – ведь волны, чтобы попасть на противоположную сторону земного шара, должны были отразиться от ионизированных слоев, и не один раз!

Изменилось отношение к радиолюбителям и со стороны государственных органов. Об этом свидетельствуют официальные обращения к радиолюбителям с просьбами и предложениями о совместных экспериментах в области распространения коротких волн. Радиолюбителям выдаются специальные диапазоны частот для их экспериментов. А ионосфера продолжает преподносить все новые и новые сюрпризы. Днем связь есть, ночью ее нет, или наоборот... Да что там день или ночь – в течение нескольких часов условия прохождения КВ могут резко изменяться без всяких видимых причин. Необходимы обстоятельные исследования. И такие



Пути распространения радиоволн

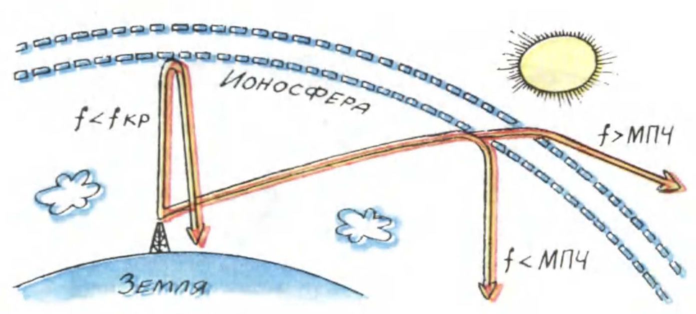
исследования проводятся – и теоретические, и экспериментальные. Давайте вкратце познакомимся и с теми и с другими.

Теоретики рассчитали показатель преломления ионосферы для радиоволн – он получился меньше единицы. Напомним, что показатель преломления в вакууме равен единице, а для обычных сред он больше единицы. Кроме того, показатель преломления ионосферы оказался сильно зависящим от частоты колебаний электромагнитной волны – чем больше частота, тем он ближе к единице. Как известно, волны всегда преломляются в сторону среды с большим показателем преломления. Следовательно, и радиоволна, попадая из стратосферы в ионосферу, преломляется и направляется обратно к поверхности Земли.

Способность ионосферы отражать, а точнее говоря, преломлять радиоволны зависит и от угла падения волны на ионизированный слой. Если радиолуч послать вертикально вверх, то он может вернуться обратно, а может, пронизав ионосферу, безвозвратно исчезнуть в просторах космоса. Все зависит от частоты электромагнитных колебаний: если она ниже некоторой критической частоты, то луч возвращается, если выше – то нет. Ученые показали, что критическая частота зависит только от концентрации электронов в слое. Но критическую частоту можно измерять экспериментально, посылая к ионосфере радиосигналы. Таким образом, мы получаем новое средство исследования верхних слоев атмосферы, в частности средство для определения концентрации в них заряженных частиц.

Радиолуч, посланный наклонно, отражается ионосферой лучше. Касательные к горизонту лучи обеспечивают наибольшую дальность связи. Частота колебаний касательного луча, еще отражающегося от ионосферы, выше критической частоты в три – пять раз. Она называется максимальной применимой частотой или, сокращенно, МПЧ. Волны с частотами выше МПЧ, посланные с поверхности Земли, уже ни при каких условиях не могут вернуться обратно на Землю – недостаточно преломляясь в ионосфере, они уходят в космос. Максимально применимую частоту можно рассчитать, зная критическую частоту и высоту слоя.

Теоретики сказали свое слово – дело за инженерами. Для каждого слоя ионосферы желательно знать два параметра – критическую частоту и высоту над поверхностью Земли. Они очень изменчивы и зависят от времени суток, сезона, географического положения места,



Путь радиоволн в ионосфере

h, км

Лето

600

400

200

F_2

F_1

E

D

f, МГц

2 4 6 8 10

h, км

Зима

600

400

200

F

E

f, МГц

2 4 6 8 10

Ионосферные характеристики

Ионосфера

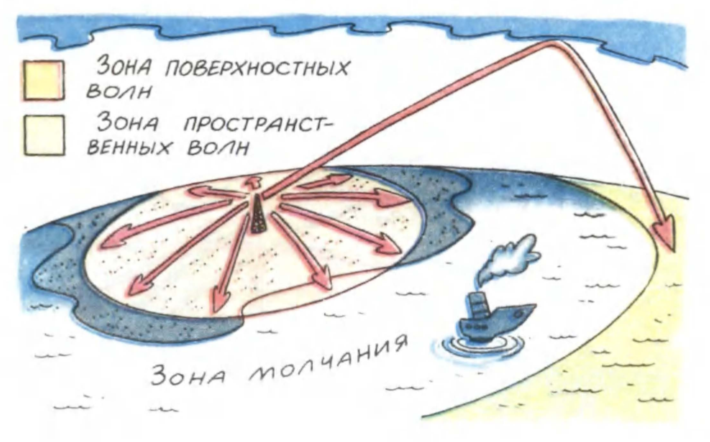
Земля

Односкачковое распространение

Многоскачковое распространение

Рикошетирующий луч

Короткие волны могут распространяться на любые расстояния



Зона молчания

где производятся измерения, и от многих других причин, не все из которых и к настоящему времени достаточно хорошо изучены. Первый эксперимент Г. Брейта и М. Туве по активному зондированию ионосферы не забыли – сейчас во всем мире постоянно действуют сотни ионосферных станций, представляющих собой КВ радиолокаторы, «стреляющие» короткими импульсами радиоволн вертикально вверх. Отраженные импульсы принимаются и регистрируются на экране электронно-лучевой трубки (подробнее о ней будет рассказано в гл. 7). Одновременно изменяется частота излучаемых импульсов. Станция устроена так, что на экране регистрируются отраженные сигналы в координатах частота – высота. Полученный график называется ионосферной характеристикой или ионограммой. По нему можно сразу определить и высоты каждого из слоев, и их критические частоты. На рисунке показаны типичные ионосферные характеристики, снятые в наших, средних широтах летом, когда Солнце высоко и интенсивность ионизации верхних слоев ионосферы велика, и зимой – при низком Солнце. Как видим, критические частоты летом выше, чем зимой. Одна и та же причина – возросший уровень солнечной радиации – вызывает летнее повышение температуры тропосферы и критических частот ионосферы.

В ионосфере своя «погода», и, как это не покажется удивительным, ее уже научились предсказывать! Институт земного магнетизма и распространения радиоволн АН СССР (ИЗМИРАН), расположенный под Москвой, публикует прогнозы, так и хочется сказать – погоды. Но не погоды, а прогнозы распространения коротких волн для всей территории Советского Союза на месяц вперед! Учесть надо многое, чтобы составить правильный прогноз. Не только время суток и года, но и фазу одиннадцатилетнего цикла солнечной активности, число пятен на Солнце, возмущения магнитного поля Земли и многое другое. Благодаря ионосферным прогнозам можно рекомендовать оптимальные частоты для радиосвязи в заданное время между любыми заданными пунктами.

Самый простой путь распространения волн, отраженных от ионосферы, – односкачковый. Дальность распространения при этом получается до 4000 км. Более сложный путь распространения – многоскачковый, когда волна несколько раз переотражается ионосферой, затем Землей, еще раз ионосферой, и т. д. Особенно малые потери мощности сигнала получаются при рикошетирующем распространении, когда радиоволны возвращаются на Землю, несколько раз переотразившись от ионосферы. Наиболее благоприятные условия для возникновения рикошетирующих волн возникают в утренние и вечерние часы, когда слои ионосферы наклонны к горизонту. Напомним, что на ночной стороне Земли высота слоев больше, чем на дневной.

На КВ неоднократно наблюдали кругосветное эхо, когда сигнал, посланный с помощью направленной антенны на восток, приходит снова к месту расположения передатчика с запада. Время запаздывания кругосветного эхо составляет около 0,14 с. Полагают, что число отражений волны от ионосферы при кругосветном эхо достигает 12–14. Разговор о «чудесах» коротких волн можно продолжать долго. Вот, к примеру, любопытное явление: «зона молчания», или «мертвая зона». Пусть мы вылетели на самолете (или вышли на корабле, кому как нравится) из города, где работает КВ радиостанция, и во время пути прослушиваем ее работу. Сначала благодаря поверхностной волне мы ее хорошо слышим, но на расстоянии 150...200 км волна уже не способна преодолеть кривизну поверхности, и сигнал радиостанции пропадает. Терпеливо

ждем (на корабле терпения нужно больше), и при расстоянии 1500...2000 км сигнал появляется снова! Вокруг радиостанции образовалось как бы кольцо «зоны молчания», где поверхностных волн уже нет, а волны, отраженные от ионосферы, еще не пришли. Внимательный читатель отметит для себя, что «зона молчания» образуется лишь при работе передатчика на частоте выше критической, когда вертикальные лучи уже не отражаются ионосферой.

Как вы помните, МПЧ – это максимальная частота волны, еще отражающейся от ионосферы. Значит, на всех частотах ниже МПЧ возможна связь на дальних и сверхдальних трассах? Ничего подобного! С понижением частоты возрастает и поглощение радиоволн в ионосфере. Поэтому значительно понижать частоту тоже нельзя. Ввели понятие наинизшей применимой частоты (НПЧ). Где-то между МПЧ и НПЧ лежит оптимальная для данной трассы частота, на которой только и гарантирована надежная связь. Например, в летний полдень значения МПЧ возрастают до 20...30 МГц. В этих условиях хорошо проходят волны, например, 13- и 16-метровых радиовещательных диапазонов – на них слышно много дальних станций. А в диапазонах 41 и 49 м можно принять лишь местные радиостанции, сигнал которых распространяется земной волной. День клонится к вечеру, и «оживают» диапазоны 19, 25 и 31 м. А в диапазоне 13 м уже не слышно ни одной радиостанции! Ночью диапазоны 41 и 49 м буквально переполнены сигналами радиостанций, а на более коротковолновых (более высокочастотных) диапазонах все тихо, как в спящей квартире. Часто радисты используют даже термины «ночные волны» (длиннее 25 м) и «дневные волны» (короче 25 м). То же повторяется и при смене сезонов года: зимой лучше приходят более длинные волны.

Уровень сигнала удаленной радиостанции зависит не только от времени суток и года. В течение нескольких минут он может измениться в сотни раз. Происходят хорошо известные замирания сигнала, или фединги. Основная причина замираний – быстрых и сильных изменений уровня сигнала – интерференция нескольких волн, пришедших от передатчика к приемнику различными путями. Длины путей различны, поэтому различны и фазы пришедших сигналов. Когда волны синфазны, происходит их сложение, а когда противофазны – одна волна ослабляет другую и общая напряженность поля у приемной антенны уменьшается. Интерферировать могут волны, пришедшие одним и двумя скачками, отраженные от разных областей ионосферы, земная и пространственная волны. Другая причина федингов – неоднородность самой ионосферы. Отражающий слой может вдруг принять форму вогнутого зеркала, фокусируя лучи и усиливая сигнал, или, напротив, рассеять лучи в пространстве. Подобно обычным облакам на летнем небе, в ионосфере возникают, перемещаются и тают невидимые облака ионизированного газа, и все это отражается на уровне принимаемого сигнала. С замираниями стараются бороться, применяя различные системы автоматической регулировки усиления приемника. Эффективнее прием на несколько разнесенных в пространстве антенн.

Еще разительнее суточные измерения «ионосферной погоды» прослеживаются в диапазоне средних волн. Включите ваш приемник (все равно какой – карманный, портативный или стационарный) в диапазоне средних волн днем. Вы услышите только две-три местные радиостанции. А ночью? Эфир полон: голоса массы городов и стран зазвучат в тишине вашей квартиры. Дело в том, что волны средневолнового (СВ) диапазона отражаются слоем *E*, критическая частота которого достигает нескольких мегагерц. Но днем ниже слоя *E*

появляется слой *D*, сильно поглощающий волны СВ и длинноволнового (ДВ) диапазонов. Для сверхдлинных же волн слой *D* с критической частотой, не превосходящей 700 кГц, служит хорошим отражателем, и поглощение этих волн мало в любое время суток. Собственно, для сверхдлинных волн с длиной в несколько или даже десятки километров уже нельзя говорить о лучевом распространении – ведь высота слоев сравнима с длиной волны. И сверхдлинные волны распространяются как бы в волноводе между ионосферой и Землей.

Таковы особенности распространения радиоволн различных диапазонов. В настоящее время сверхдлинные волны используют в основном для сверхдальней телеграфной связи, передачи эталонных частот и сигналов точного времени, а также для глобальных систем навигации. Одна из них, «Омега», включает шесть – восемь передатчиков, работающих на частотах 10...14 кГц и разбросанных по всей поверхности земного шара. В любой точке Земли удается принять сигналы двух-трех передатчиков. Сравнивая фазы принятых колебаний, вычисляют местоположение судна или самолета (разумеется, это делает бортовая ЭВМ) с точностью порядка сотен метров!

Диапазоны ДВ и СВ отведены для радиовещания и иногда используются для радионавигационных систем ближнего действия. А на КВ тесно, работает много всяких служб: и радиовещание, и служебная дальняя связь, и любительская, и много-много других. В результате КВ диапазон «забит» сигналами станций до отказа. На УКВ, которые уже не отражаются ионосферой, работают телевизионные и радиовещательные передатчики с частотной модуляцией (ЧМ). Они занимают более широкий спектр частот по сравнению с АМ передатчиками диапазонов ДВ, СВ и КВ, но просторный УКВ диапазон, имеющий ширину в десятки мегагерц, это позволяет.

Однако не следует думать, что, прослушивая эфир, можно принимать только сигналы радиостанций. Эфир полон и другими, нерегулярными сигналами естественного происхождения. О них мы немного и поговорим в следующем параграфе.

Таинственные шумы, трески и шорохи эфира

Радиосигналы естественного происхождения регистрировались еще грозоотметчиком А. С. Попова. Но вот что удивительно: когда стали изготавливать приемники с огромными антеннами для диапазона сверхдлинных волн, число атмосферных разрядов, регистрируемых приемником, возрастало, хотя никаких гроз в обозримой окрестности и в помине не было. Оставалось предположить, что приемник регистрирует очень удаленные грозы. Теперь-то нам ясно, что сверхдлинные волны распространяются на расстоянии в тысячи и тысячи километров. А спектр излучения разряда молнии имеет максимум на частотах 7...30 кГц. На более высоких частотах спектральная плотность излучения равномерно уменьшается. Поэтому нет ничего странного в том, что принимаются сигналы гроз, свирепствующих очень далеко от наших мест, где в это время может стоять прекрасная погода.

На Земле в каждый данный момент бушует не менее 100–300 гроз. Подавляющее их большинство приходится на экваториальные области. Выделяют даже центры грозовой активности, расположенные в Центральной Америке и в Южной Америке в бассейне Амазонки, в тропической Африке и в Индонезии. Когда условия прохождения радиоволн из этих районов улучшаются, возрастает и уровень атмосферных помех в эфире. Одиночный грозовой разряд,

зарегистрированный приемником, радисты назвали коротко и даже как-то ласково – «атмосферик». По форме принятого атмосферика, воспроизведенной на экране осциллографа, можно судить и о пути, пройденном им в эфире. Скорость распространения различных спектральных компонентов сложного спектра атмосферика разная, к тому же разные частоты по-разному ослабляются при распространении. Как правило, составляющие нижних частот спектра поступают с меньшим ослаблением, чем верхнечастотные, поэтому и максимум атмосферных помех приходится на достаточно низкие частоты около 10 кГц. В результате, чем больший путь прошел атмосферик, тем «басовитее» и длиннее он становится. Его звук, воспроизведенный приемником, не имеет уже ничего общего с сухим треском близкого грозового разряда.

Особенно интересный характер приобретают атмосферики в диапазоне частот электромагнитного спектра, соответствующих звуковым частотам 1...16 кГц. Здесь дальний атмосферик прослушивается как свист изменяющегося тона. По длительности и диапазону изменения тона свиста можно судить о дальности до очага грозы, породившей этот «свистящий атмосферик». Она может достигать и десятков тысяч километров. Прием и «расшифровка» параметров атмосфериков довольно много дают науке при изучении верхних слоев атмосферы и путей распространения радиоволн. Что же касается техники приема, то со времен первого грозоотметчика она изменилась настолько, что стала совершенно неузнаваемой.

На рисунке показан внешний вид современного индикатора гроз. Обратите внимание на антенны. Они малогабаритны, их малые размеры компенсируются высокой чувствительностью приемника. Антенн три: ненаправленная штыревая и две направленные рамочные. Рамочная антенна принимает сигнал лучше всего в том случае, если направление магнитного поля приходящей волны перпендикулярно плоскости рамки. Поэтому направление на источник сигнала должно лежать в плоскости рамки. Диаграмма направленности рамочной антенны имеет вид восьмерки.



Грозопеленгатор

Грозопеленгатор оснащен электронно-лучевой трубкой, луч на экране которой ярко вспыхивает в момент прихода атмосферика. Яркостью луча управляет канал приема, связанный с ненаправленной штыревой антенной. Еще два канала приема, связанные с рамочными антеннами, управляют отклонением луча от центра экрана. Рамки ориентируются в направлениях север-юг (*N*-*S*) и восток-запад (*O*-*W*). Аналогичные обозначения наносят и на краях экрана. В результате каждый разряд молнии вызывает появление на экране светящейся полоски, ориентация которой указывает направление на грозу, а длина-интенсивность разряда. Таким образом, современный грозоотметчик указывает не только на существование грозового очага, но и определяет направление на него. В зависимости от чувствительности каналов приема (которую можно регулировать) грозопеленгатор может регистрировать как местные (100... ...300 км), так и весьма удаленные (тысячи километров) грозы. Для регистрации местных гроз теперь все чаще используют метеорологические радиолокаторы.

Следующим, а в крупных городах первым по значению источником помех радиоприему является деятельность человека. Проведите небольшой опыт. Включите приемник, найдите свободную от сигналов радиостанций частоту в диапазонах ДВ или СВ и увеличьте громкость до предела. Что вы слышите? Если не сплошной треск, то уж нерегулярные потрескивания и щелчки обязательно. А теперь включите настольную лампу или любой другой электроприбор. Слышали щелчок в момент включения? Представьте, сколько электрических установок, выключателей и искрящих контактов в большом городе окружает нас! Ведь каждая искра в выключателе, микроскопическая дуга между щеткой и коллектором электродвигателя, служат возбудителями радиочастотных колебаний, точно так же, как и в первом искровом передатчике Герца. А электрические провода служат прекрасными антеннами. Нельзя сказать, что против индустриальных помех не применяется никаких мер борьбы. Правильно сконструированные электрические сети обязательно оснащаются устройствами для подавления помех. Любой искрящий контакт должен оснащаться искрогасящим устройством и противопомеховым фильтром. В простейшем случае им может быть обычный конденсатор, шунтирующий контакт. Повышается и помехоустойчивость радиоприемных устройств. Редкие щелчки хорошо подавляются ограничителями импульсных помех. Борьба с непрерывными «гладкими» помехами значительно сложнее, но и здесь поможет правильное проектирование входных цепей приемника и использование специальных помехоустойчивых антенн.

Но все это-будни радиоприема и радиосвязи, а как же с праздниками? Как обстоит дело с приемом радиосигналов от внеземных цивилизаций? Собственно говоря, в процессе развития радиотехники их принимали неоднократно. Правда, потом оказывалось, что это нечто совсем иное... Слишком велико желание, очень уж велика тяга у людей к таинственному и необыкновенному. Лишь только появились первые радиоприемники-стали ждать сигналов с Марса. Тем более, что в те годы Марс располагался на орбите близко к Земле. В телескопы внимательно изучали марсианские каналы. А. Толстой написал знаменитую «Аэлиту». Радиосигналов от разумных существ, правда, не дождались. Но эфир слушали, продолжая заниматься обычной рутинной инженерной и исследовательской работой. И космические сигналы были приняты! Это случилось совершенно неожиданно.

Американский радиоинженер-исследователь К. Янский в декаб-

ре 1931 года был далек от мысли о внеземных источниках излучения. Он измерял и анализировал уровень шума в эфире на коротких волнах. Ясно прослеживался суточный ход уровня помех, связанный с изменениями условий прохождения радиоволн. Занимаясь исследованиями достаточно долго, Янский обнаружил, что максимум помех на самых коротких волнах, длиной около 15 м, наступает в каждый последующий день на четыре минуты раньше, чем в предыдущий. А это значит, что периодичность изменений соответствует не солнечным, обычным суткам, а звездным, продолжительность которых составляет 23 ч 56 мин. Ведь Земля, вращаясь вокруг Солнца, за год делает еще один, дополнительный оборот вокруг своей оси. Отсюда следовало, что источник шумов лежит вне Солнечной системы!

Последующие наблюдения с помощью направленных антенн показали, что максимум интенсивности принимаемых шумов соответствует направлению на центр нашей Галактики и как бы «размыт» вдоль Млечного Пути. Открытие Янского положило начало новой науке – радиоастрономии, занимающей теперь одно из ведущих мест в изучении Вселенной. Вторая мировая война надолго прервала радиоастрономические исследования. Но после ее окончания в руках ученых оказалась новая техника – техника дециметровых и сантиметровых волн, позволившая построить антенны высокой направленности и чувствительные радиоприемники. С их помощью были открыты радиозвезды – точечные и необычайно мощные источники радиоизлучения. Долго не удавалось отождествить радиозвезды с какими-либо видимыми астрономическими объектами. Первым отождествили мощный радиоисточник в созвездии Тельца. Его положение совпало с положением наблюдаемой в оптическом диапазоне Крабовидной туманности. Эта туманность является остатком сверхновой звезды, ярко вспыхнувшей в 1054 году. Сведения об этой вспышке найдены в древних китайских летописях. Как указывают летописцы, звезду было видно даже днем, настолько она была яркой. Теперь эта газовая туманность расширяется со скоростью 115 млн. км в сутки. А находится она от нас на расстоянии 4100 световых лет!

Радиоастрономия за немногие годы своего существования сделала поразительные открытия. Оказалось, что многие мощные источники радиоизлучения лежат не в нашей Галактике, а далеко за ее пределами. Эти источники так и назвали – радиогалактики. Одна из радиогалактик, например, представляет собой не одну, а две галактики, столкнувшиеся и как бы пронизавшие одна другую. Плотность звезд в галактиках очень мала, поэтому для звезд никаких особо вредных последствий от столкновения галактик нет. Но столкновения хотя и очень разреженных облаков межзвездного газа как раз и вызывают сильное радиоизлучение.

В очередной раз умы исследователей были взбудоражены в 60-х годах, когда на одном из английских радиотелескопов зарегистрировали правильно повторяющийся радиосигнал с периодичностью в несколько секунд. Эта запись совсем уже напоминала телеграфный сигнал, и первой мыслью была мысль о внеземной цивилизации. Но периодичность сигнала оставалась строго постоянной, а как мы теперь знаем, правильный периодический сигнал никакой информации не несет. Источник сигнала назвали пульсаром. Были открыты и другие подобные источники. Пульсары удалены от нас на миллиарды световых лет – сейчас радиотелескопы «видят» гораздо дальше, чем самые совершенные оптические телескопы. Пульсары являются как бы «хронометрами» Вселенной, и сейчас идет речь о том, чтобы использовать их излучение как эталон точного времени.

В заключение главы о радиоволнах хотелось бы сказать еще несколько слов о грядущей космической электромагнитной астрономии. Атмосфера Земли имеет два главных «окна прозрачности». Одно лежит в диапазоне световых волн с длинами 0,4...0,7 мкм. И благодаря ему мы наслаждаемся теплом солнечных лучей днем, светом Луны и звезд ночью, благодаря ему возможна самая древняя наука – оптическая астрономия. Другое окно прозрачности атмосферы – радиоокно. С одной стороны его ограничивает критическая частота ионосферы, соответствующая длинам волн 20...50 м, а с другой – частоты поглощения молекул водяного пара и атмосферных газов, соответствующие миллиметровым волнам. Как видим, радиоокно в тысячи раз «шире» оптического. Оно позволило появиться одной из самых молодых наук – радиоастрономии. Но ведь космос интересно исследовать и в других диапазонах волн – инфракрасном, субмиллиметровом, рентгеновском. Такие исследования становятся возможными с созданием в космосе астрономических обсерваторий. Уже выведен на околоземную орбиту спутник с рентгеновским телескопом, широко используется в космических исследованиях инфракрасная техника. Особо следует подчеркнуть, что появление новых научных и технических направлений очень тесно связано с успехами радиоэлектроники – ведь все приемники изучения, системы регистрации, наведения и управления построены на основе электронной техники.

Ну а теперь, имея минимальные сведения о распространении радиоволн в условиях Земли, имеет смысл рассказать о конкретных радиоэлектронных устройствах, и прежде всего о том, из чего они сделаны.

5. «КИРПИЧИКИ» РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Поговорим о строительстве соборов и вычислительных машин, о «дырках» в веществе, выпрямлении гвоздей и переменного тока, о транзисторах и интегральных схемах, объединяющих тысячи транзисторов, о том, как сделать усилитель и счетчик импульсов, и о многом другом, что лежит в основе радиоэлектроники.

Об одном разговоре во французском городе Шартре

Давным-давно во французском городе Шартре, когда однажды строителей спросили, что они делают, один ответил: «Ношу кирпичи». Другой сказал: «Готовлю раствор». Третий, не отрываясь от работы, буркнул: «Наращиваю леса». И лишь один, выпрямившись и гордо оглядев уже сделанное, произнес: «Я строю Шартрский собор!».

Как часто за мелочами не видно главного! В современной высокоразвитой электронной промышленности заняты десятки тысяч человек. Одни выращивают высокочистые полупроводниковые кристаллы, другие изготавливают на высокоточном оборудовании интегральные микросхемы, третьи разрабатывают их топологию, четвертые заняты программным обеспечением ЭВМ, есть масса



Я строю...

занятий для пятых, шестых и т.д... Но все они вместе возводят одно величественное здание современной электроники – техники, без которой уже не может обойтись ни одна отрасль народного хозяйства.

Любое современное здание, например жилой дом, строится из весьма ограниченного набора блоков – панелей, балок, перекрытий. Расположив эти блоки в различных сочетаниях, можно построить и низкое длинное здание, и возвышающийся как башня над всем городом небоскреб. Даже при ограниченном наборе основных блоков архитекторам предоставлена широкая свобода для творчества. Так и в современной электронике из сравнительно небольшого числа основных «базовых» блоков: транзисторов, конденсаторов, резисторов и т.д. – можно создать бесчисленное множество электронных



Стандартный корпус интегральной микросхемы

устройств: радиоприемники, телевизоры, аппараты записи и воспроизведения звука, передачи данных, ЭВМ и многие-многие другие.

Этим занимаются помимо промышленности и радиолюбители. Из весьма скромного набора основных «блочков-кирпичиков», имеющихся в их распоряжении, они конструируют все, что угодно,– от электронного дверного звонка, исполняющего веселую мелодию, до сложных синтезаторов современных вокально-инструментальных ансамблей, от детской игры «Первоклассница», умеющей складывать $1 + 1 = \ldots$, до персональной ЭВМ, способной сыграть с вами партию в шахматы или рассчитать, на какой день недели придется первое апреля в 3995 году (хотя эту задачу может решить и микрокалькулятор, собранный из меньшего числа тех же блочков).

Так что же это за «блочки-кирпичики»? Чаще всего – серийные интегральные микросхемы. Некоторые из них и по форме напоминают маленький пластмассовый кирпичик с двумя гребенками выводов. Все микросхемы делят на два больших класса – аналоговые и цифровые. Названия соответствуют аналоговым и цифровым сигналам, для обработки которых предназначены эти микросхемы.

К аналоговым относятся усилители, генераторы, преобразователи сигналов, к цифровым – логические элементы, триггеры, счетчики, шифраторы и дешифраторы, регистры сдвига, устройства памяти, микропроцессоры.

Что находится внутри радиоэлектронного «кирпичика»

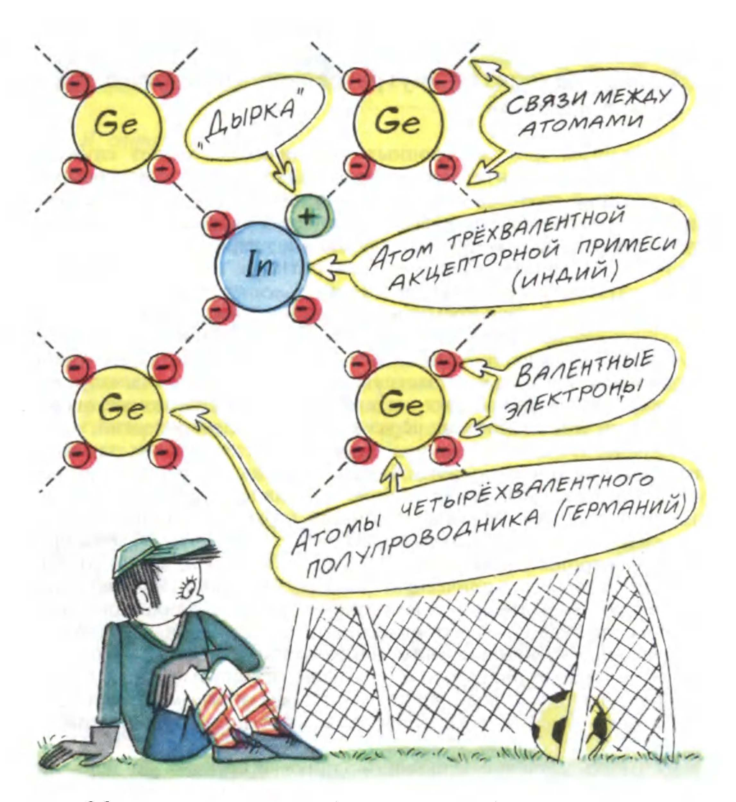
Сырьем для электронных «кирпичиков» может служить обычный песок. Не верите? Песок представляет собой окись кремния SiO_2. А кремний является основой для производства подавляющего большинства полупроводниковых элементов электроники. Разумеется, нужны и другие материалы: пластмасса, керамика, алюминий, серебро и даже золото. Разрезать аккуратно и точно кремниевую пластинку лучше всего алмазной пилой.

Но вернемся к окиси кремния. Кремний из окиси можно восстановить химической переработкой. Чистый кремний относится к классу полупроводников. Сейчас нам предстоит решить, что такое полупроводник и чем он отличается от проводника или диэлектрика.

Электрический проводник – это вещество, оказывающее малое сопротивление протекающему через него току. Электрический ток, в свою очередь, есть направленное движение электрических зарядов. Значит, в проводнике должны быть свободные заряды, которые могут легко передвигаться в любом направлении. Все металлы – хорошие проводники. Мы уже говорили (помните киплинговскую кошку, которая «гуляла сама по себе»?) о том, что в металлах внешние электроны атомов становятся свободными, когда атомы объединяются в кристаллическую решетку. Свободные электроны образуют так называемый электронный газ, заполняющий весь объем металла. Если в проводнике течет ток, электроны перемещаются преимущественно в одном направлении. Если же тока нет, электроны все равно движутся, но это движение хаотическое, тепловое. Оно создает шум – небольшое, случайным образом изменяющееся напряжение на выводах проводника или полупроводникового элемента.

Из самого названия «полупроводник» ясно, что он еще «не дорос» до настоящего проводника и, следовательно, проводит ток гораздо хуже. Свободных электронов в полупроводнике мало, по-

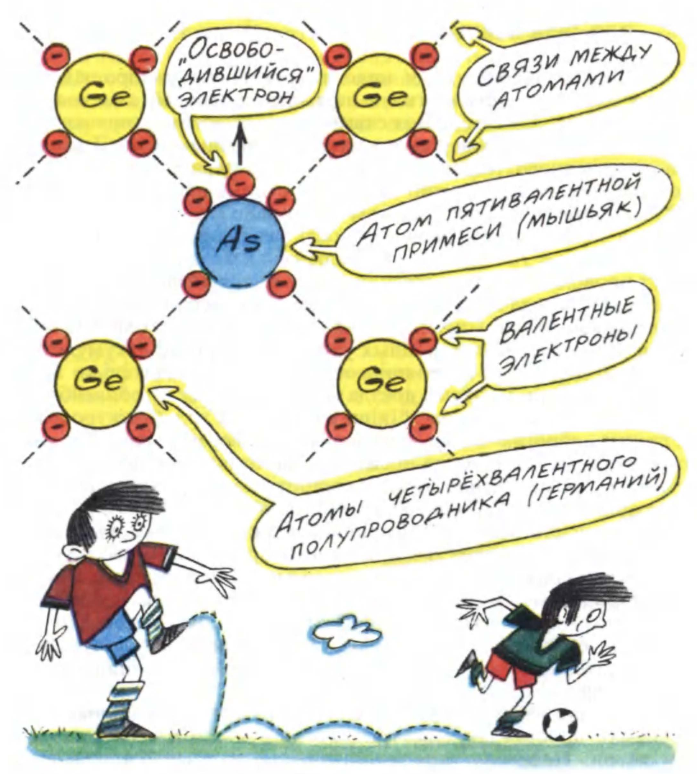
скольку почти все электроны как бы привязаны к своим атомам. Правда, при сильном нагреве тепловое движение становится интенсивнее и некоторые из электронов отрываются от своих атомов, становясь свободными. Проводимость вещества при этом увеличивается. Вот почему полупроводниковые приборы очень боятся перегрева – проводимость может возрасти настолько, что ток в полупроводнике резко увеличится и наступит так называемый тепловой пробой. Чтобы не утомить вас, приведу лишь несколько цифр. Удельное сопротивление вещества – величина, обратная проводимости, – измеряется в омах на метр (Ом·м). Это сопротивление бруска вещества сечением 1 $м^2$ и длиной 1 м. Вот это брусочек! Но что поделаешь, в международной системе единиц СИ единицей длины служит метр. Ну так вот: сопротивление медного бруска составляет всего $0{,}017 \cdot 10^{-6}$ Ом. А сопротивление бруска тех же размеров, изготовленного из такого типичного диэлектрика, как стекло, равно $5 \cdot 10^{13}$ Ом, т.е. на двадцать один порядок (10^{21}) больше! Удельное сопротивление полупроводников находится где-то между этими крайними значениями. Дать конкретные величины трудно, они зависят от вида вещества, его чистоты и многих других факторов.



Образование примесной дырочной проводимости

Чем чище полупроводник, тем ближе его свойства к свойствам диэлектрика. Но если в полупроводник введена примесь, то проводимость резко возрастает. Различают два вида примесей: акцепторные и донорные. Валентность вещества акцепторной примеси меньше, чем валентность самого полупроводника. Это значит, что во внешнем электронном слое атомов примеси меньше электронов, чем у атомов полупроводника. В этом случае примесь по отношению к электронам атомов полупроводника ведет себя как агрессор: она захватывает их. В результате в кристаллической решетке вещества появляются атомы, которым не хватает одного электрона. Заряд этих атомов положителен. Они притягивают отрицательно заряженные электроны, и при первой же возможности атом, у которого не хватает электрона, захватывает его у соседнего атома. Положительный заряд при этом перемещается к соседнему атому. Тот, в свою очередь, захватывает электрон у соседа. Таким образом, положительный заряд перемещается еще дальше. Теперь оказалось, что в толще полупроводника с акцепторной примесью «гуляет сам по себе» положительный заряд, обусловленный нехваткой одного электрона. Заряд этот очень образно называют «дыркой».

Иное дело, если в полупроводник введена донорная примесь.



Образование примесной электронной проводимости

Валентность вещества примеси на единицу больше валентности самого полупроводника. Это значит, что во внешней электронной оболочке атомов вещества примеси на один электрон больше, чем у атомов полупроводника. Объединяясь в кристаллы, атомы примеси используют для валентных связей все внешние электроны, кроме одного. В образовавшемся кристалле «лишние» электроны атомов примеси оказываются без работы. «Безработные» электроны свободно перемещаются по всему кристаллу, но все рабочие места – валентные связи – заняты. Эти электроны легко устремляются по направлению даже слабого электрического поля, создавая электрический ток.

Таким образом, вводя различные примеси, мы можем получить полупроводник с дырочной проводимостью (*p*-типа) и с электронной проводимостью (*n*-типа). Сами названия *p* и *n* произошли от начальных букв английских слов positive и negative, обозначающих знак свободных зарядов (положительный или отрицательный). Чем выше концентрация примеси в полупроводнике, тем выше и его проводимость. Как только физики и инженеры научились получать полупроводники с различными типами проводимости, тут же появились и приборы, выполненные на их основе.

Что легче выпрямить: гвоздь или переменный ток?

Справедливости ради надо заметить, что за прошедшие несколько сотен лет технология выпрямления гвоздей заметно не изменилась. Этого совсем нельзя сказать о технологии выпрямления переменного тока. Прежде всего: а зачем его выпрямлять? Преимущества переменного тока очевидны: при передаче на большие расстояния напряжение можно повысить с помощью трансформатора. Ток в линии передачи при этом во столько же раз уменьшится, ведь одна и та же передаваемая мощность равна произведению тока и напряжения: $P = IU$. Значит, для передачи высокого напряжения подойдут провода меньшего сечения, уменьшатся их нагрев и потери мощности при передаче. Теперь в силовых сетях используют только переменный ток. Но во многих случаях необходим постоянный ток. Он нужен для питания электронных устройств, зарядки аккумуляторов. Тяговые двигатели постоянного тока имеют значительно лучшие характеристики. Поэтому поезда метро, трамваи и троллейбусы работают на постоянном токе. Лишь в последние годы электровозы на железных дорогах стали переводить на переменный ток, но электродвигатели на них по-прежнему работают на постоянном токе. Значит, промышленности и транспорту необходимы устройства, превращающие переменный ток в постоянный.

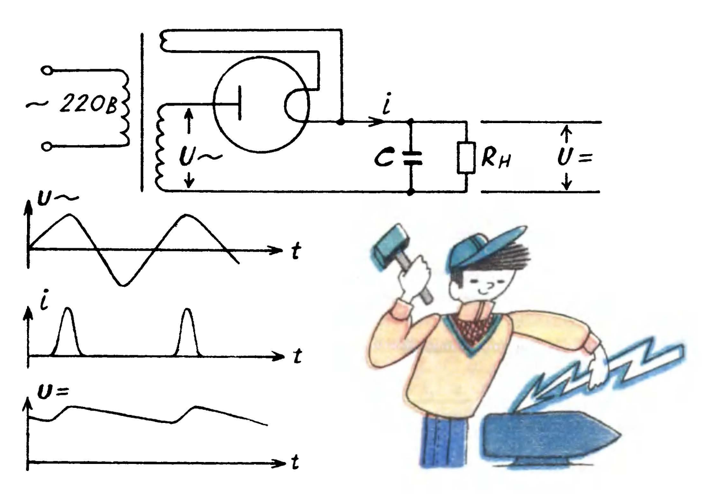
В технике часто используют принципы, уже известные, выдвинутые давным-давно или подсказанные самой природой. В рассматриваемом случае подходят два принципа: мышеловки и горки. Обобщенный принцип мышеловки заключается в следующем: некоторая дверца открывается легко, если двигаться с одной стороны, и не открывается – если двигаться с другой. Этот принцип используется в любом клапане, например в клапане насоса для накачивания волейбольного мяча.

Электронная лампа – тоже клапан. Выпрямить переменный ток может самая простая двухэлектродная лампа – диод, – содержащая анод и катод. Носители заряда – электроны – излучаются накаленным катодом и двигаются к аноду только тогда, когда он заряжен

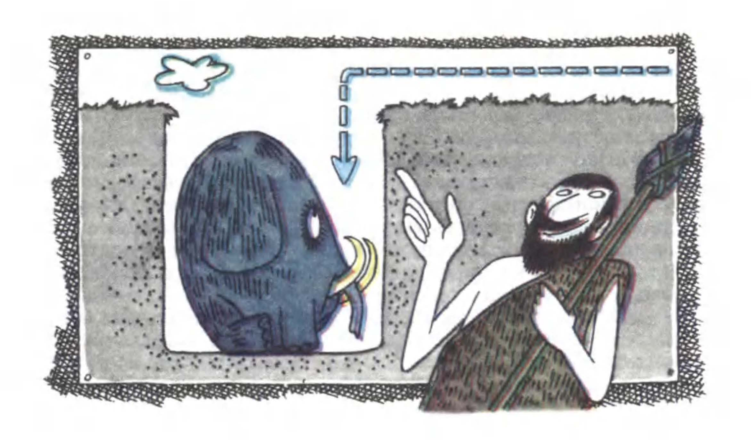
положительно. При этом через диод проходит электрический ток. Если же на аноде отрицательный потенциал, электроны отталкиваются и тока через диод нет. Если на анод диода подать переменное напряжение, а последовательно с диодом включить нагрузку, то в цепи нагрузки будет проходить пульсирующий ток одного направления, т. е. уже почти постоянный. Для уменьшения пульсаций тока параллельно нагрузке включают сглаживающие конденсаторы или используют многофазные схемы выпрямителей. Долгие годы вакуумный диод был единственным прибором для выпрямления переменного тока. У него было много недостатков. Трудно получить большой ток: нужен мощный катод, излучающий большой поток электронов, а на его накал тратится большая мощность. Анод под ударами электронов тоже сильно разогревается. В результате вакуумная двухэлектродная лампа – кенотрон – не может выпрямить ток с высоким коэффициентом полезного действия. Для питания радиопередатчиков и других мощных установок изобрели газонаполненные диоды – газотроны, дуговые лампы, «поджигаемые» только во время положительных полуволн переменного напряжения, и многое другое. Но главная проблема – снижение мощности, рассеиваемой внутри выпрямителя, – оставалась нерешенной. Поэтому, например, до последнего времени и не было электровозов, работающих на переменном токе, поскольку не было эффективных выпрямителей.

Но разговорившись о ламповых выпрямителях, мы как-то забыли про другой принцип получения однонаправленного движения – принцип горки. Катиться с горки легко, а взбираться трудно. А если горка очень крутая и скользкая – то просто невозможно.

Похожим принципом пользовались еще первобытные охотники, устраивая ямы-ловушки. Зверь может упасть в яму, и выбраться из нее ему уже вряд ли удастся. А что если и для электрических зарядов устроить такую горку, разумеется электрическую, чтобы они легко скатывались под горку, но не могли выбраться назад? Подобная

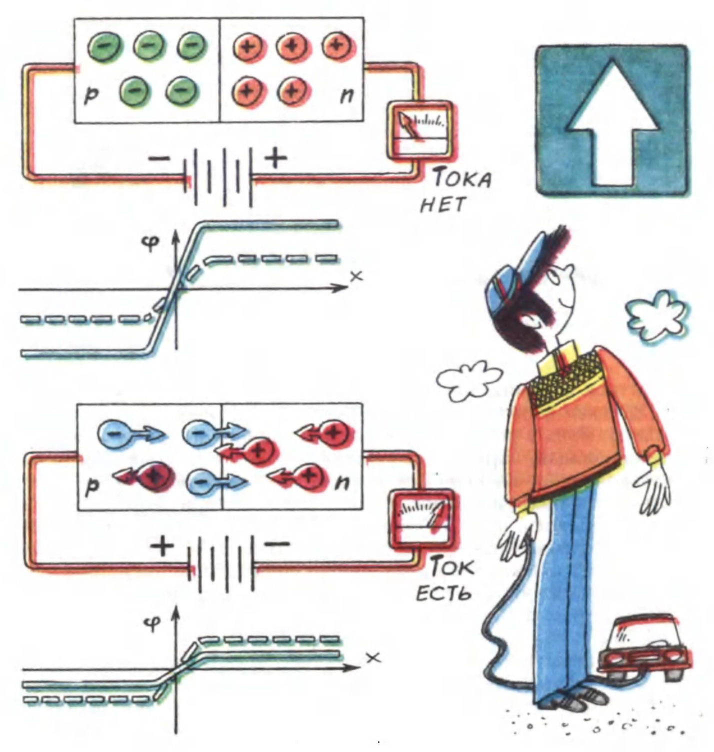


Выпрямитель на вакуумной лампе кенотроне



Яма-ловушка

Потенциальный барьер, образующийся в p-n переходе

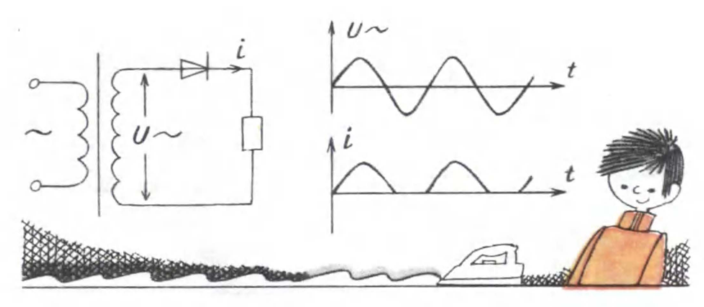


Полупроводниковый диод пропускает ток только в одном направлении

горка называется потенциальным барьером. Он обязательно образуется в месте контакта двух веществ с различными типами проводимости – дырочным (*p*-тип) и электронным (*n*-тип). Веществами могут быть полупроводник *p*-типа и металл или два полупроводника *p*- и *n*-типов проводимости.

Вот как это происходит. В веществе с проводимостью *n*-типа избыток свободных электронов, а в веществе с проводимостью *p*-типа, напротив, электронов не хватает. Разумеется, электроны устремляются оттуда, где «густо», туда, где «пусто». А дырки двигаются в противоположном направлении. Очень образный пример, иллюстрирующий природу и движение электронов и дырок, приведен в учебнике физики для вузов Г. А. Зисмана, О. М. Тодеса: электрон можно представить как капельку воды над поверхностью, а дырку – как пузырек воздуха под ней. Одна и та же сила тяжести заставляет капельку двигаться вниз, а пузырек воздуха – вверх. Подобным же образом электроны и дырки перемещаются в противоположных направлениях под действием одного и того же электрического поля.

Контакт *p*- и *n*-полупроводников назван *p*-*n* переходом. Итак, дырки и электроны двинулись через переход. Долго ли будет

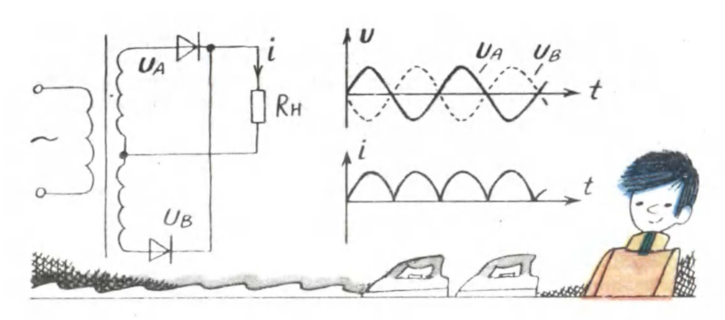


Однополупериодный выпрямитель

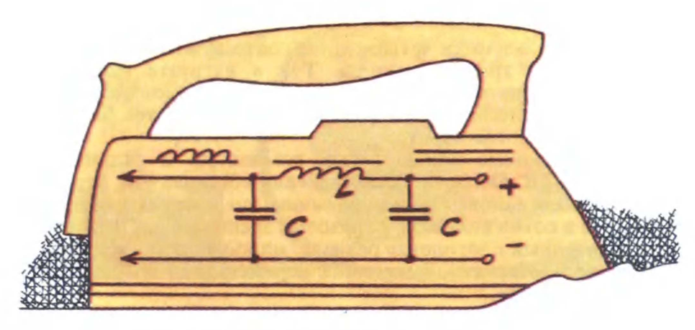
продолжаться их движение? Наверно, нет. Как и на любом перекрестке, должен вспыхнуть красный свет, прекращающий движение по переходу. Ведь в результате движения зарядов *p*-область получает отрицательный. заряд, а *n*-область – положительный. В точке контакта возникает электрическое поле, препятствующее (как красный свет светофора) дальнейшему движению. Теперь дыркам, чтобы попасть в *n*-область, надо забраться на потенциальную горку высотой $\Delta\varphi$, т. е. преодолеть потенциальный барьер. То же самое относится и к электронам: поскольку они отрицательны, то и горка со склоном вниз для них препятствие. Значение $\Delta\varphi$ определяется только свойствами веществ, образующих переход, и еще немного зависит от температуры.

А вот теперь начинается самое интересное. В любом полупроводниковом диоде есть *p-n* переход. Собственно, кроме перехода диод имеет лишь корпус и выводы. Диод пропускает ток только в одном направлении. Давайте мысленно поэкспериментируем. Приложим внешнее напряжение «плюсом» к *n*-области, а «минусом» – к *p*-области. Этим мы только увеличим высоту горки или потенциального барьера. При этом всякое движение зарядов через переход прекратится и тока в цепи не будет. Поменяем полярность внешнего напряжения. Это уменьшит высоту потенциального барьера, и, следовательно, уже ничто не будет мешать носителям заряда двигаться через переход, т. е. в цепи появится электрический ток.

Полупроводниковый диод пропускает ток только в одном направлении. Это направление называется прямым, а ток – прямым,



Двухполупериодный выпрямитель

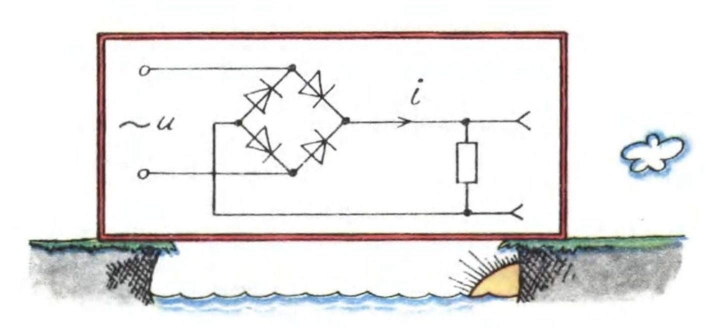


Сглаживающий фильтр

или отпирающим. Допустимое значение прямого тока определяется площадью контакта и для мощных диодов может составлять десятки ампер. В то же время значение обратного тока обычно пренебрежимо мало́ и исчисляется микроамперами. Если нужно выпрямить еще больший ток, несколько полупроводниковых диодов соединяют параллельно.

Схема простейшего выпрямителя на полупроводниковом диоде мало отличается от приведенной схемы выпрямителя с кенотроном. Она даже упрощается – становится ненужной обмотка силового трансформатора, питающая накал лампы. Но у такого выпрямителя, называемого однополупериодным, есть недостаток: ток в нагрузку течет лишь во время одного полупериода переменного напряжения. Чтобы «заставить работать» и второй полупериод, устанавливают второй диод и наматывают еще одну обмотку (вторичную) силового трансформатора. Напряжения на диодах U_A и U_B имеют противоположную полярность, они противофазны. Поэтому диоды выпрямителя работают поочередно: когда один диод проводит ток, другой заперт, и наоборот. У нас получился двухполупериодный выпрямитель. Ток в нагрузке теперь пульсирует с частотой 100 Гц, а не 50, как ранее. В простейших случаях пульсации устраняются конденсатором большой емкости, когда же требуется более точное сглаживание, используют фильтр нижних частот.

Аналогичными свойствами обладает и мостовая схема выпря-



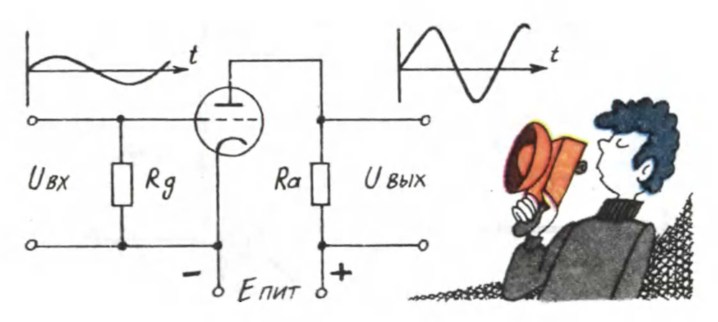
Мостовой выпрямитель

мителя. В ней используются четыре диода, зато нужна только одна вторичная обмотка трансформатора. Ток в нагрузке мостового выпрямителя имеет точно такой же вид, как и у двухполупериодного. Специально для мостовых выпрямителей выпускаются блоки из четырех диодов в одном корпусе.

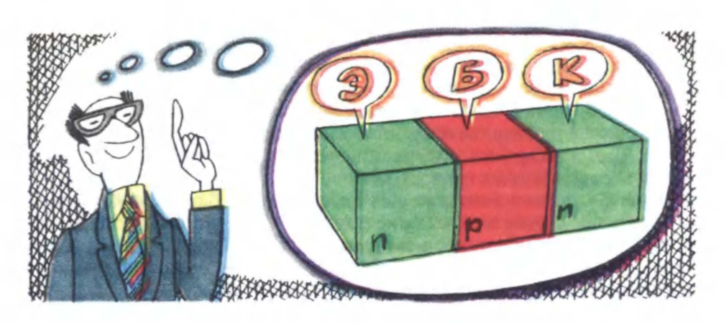
Полупроводниковые диоды легки, компактны и отличаются очень высоким КПД. Область их применения обширна – от детектирования слабых сигналов в радиоприемнике до выпрямления тока при мощностях в сотни киловатт в грузовых электровозах. Теперь на вопрос, поставленный в заголовке раздела, мало-мальски сведущие в электронике люди ответят: «Выпрямить переменный ток? Разумеется, нет ничего проще!».

Триод из ... полупроводника?

Инженерам, воспитанным на электровакуумной технике, эта мысль казалась нелепой еще в 50-х годах. Ведь триод – это радиолампа, содержащая катод, анод и управляющую сетку. Потенциал сетки управляет анодным током, и благодаря этому эффекту получают усиление сигналов. Вот как это делается: входное напряжение сигнала прикладывают между сеткой и катодом. Для того чтобы случайные электроны, осевшие на сетке, отправлялись обратно к катоду, включают резистор утечки сетки R_g. В анодную цепь последовательно с источником питания включают резистор нагрузки R_a. Под действием входного напряжения изменяется анодный ток. Каждую лампу характеризуют рядом параметров, в том числе и крутизной характеристики $S = \Delta i_a/\Delta u_g$ – величиной, показывающей, на сколько изменится анодный ток при изменении потенциала сетки на 1 В. Принцип «чем больше, тем лучше» оправдывается и здесь. Обычно стремятся получить максимальную крутизну характеристики в рабочей точке, т. е. при заданных напряжениях на электродах. Анодный ток, проходя через резистор нагрузки, создает на нем некоторое падение напряжения. Его постоянная составляющая обычно не используется, а вот изменения, вызванные изменениями анодного тока, служат полезным выходным сигналом $u_{вых} = \Delta i_a R_a$. Выразите изменения анодного тока через изменения сеточного напряжения $\Delta u_g = u_{вх}$ и подставьте в последнюю формулу. У вас получится $u_{вых} = SR_a u_{вх}$. Произведение SR_a является коэффициентом усиления лампы по напряжению. Хотя мы получили упрощен-



Усилитель на электровакуумной лампе (триоде)



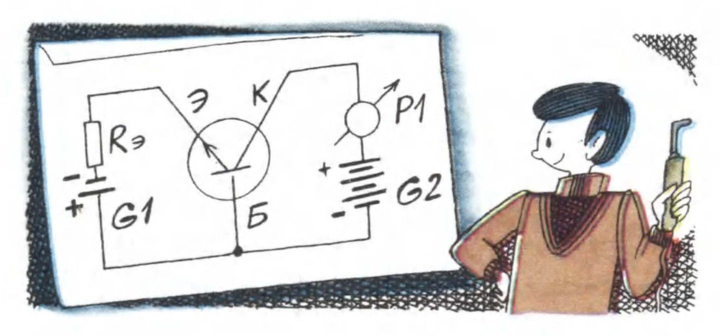
Структура транзистора n-p-n типа

ную формулу, она дает верное представление о значении коэффициента усиления.

Ну вот, мы посмотрели, как действует усилитель электрических сигналов на электровакуумной лампе. Его коэффициент усиления может достигать нескольких десятков, а иногда и сотен раз.

Как же сделать триод из полупроводника? Эту задачу решили в 1948–1949 годах американские ученые Д. Бардин, В. Браттайн и У. Шокли, за что они были удостоены Нобелевской премии в области физики.

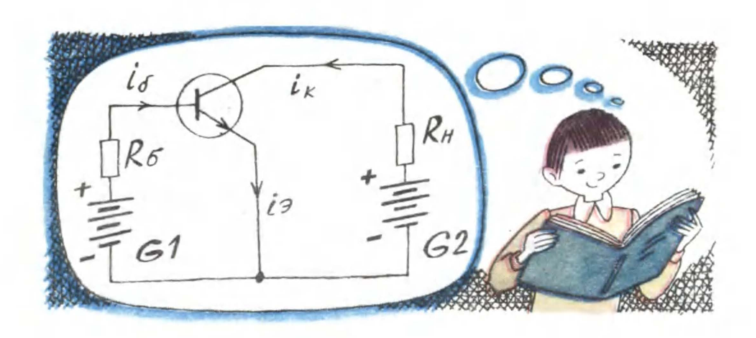
Давайте посмотрим, как им удалось сделать транзистор. Объединим два диода, как показано на рисунке. Область *p* в середине структуры называется базой, одна из *n*-областей – эмиттером, а другая – коллектором. Из самих названий ясно, что эмиттер должен что-то излучать, или испускать, а коллектор – это «что-то» собирать. Но что можно испускать в полупроводнике? Разумеется, носители заряда – электроны или дырки. Следовательно, на эмиттерный переход надо подать отпирающий потенциал, тогда через этот переход пойдет ток и возникнет движение зарядов. Вот схема включения полупроводникового триода, или транзистора. Транзистор здесь уже изображен так, как его обычно указывают на принципиальных схемах электронных устройств. База (Б) обозначена черточкой, эмиттер (Э) – стрелкой, а коллектор (К) – просто наклонной линией, подходящей к базе. Стрелка эмиттера показывает направление тока через эмиттерный переход. Этот ток создается батареей *G1*. А чтобы



Включение транзистора по схеме с общей базой

он не достигал очень больших значений, ведь сопротивление открытого *p-n* перехода весьма мало́, включен ограничивающий ток резистор $R_э$. Итак, из эмиттера в толщу полупроводника (хотя какая там толща – толщина базы современных транзисторов измеряется микрометрами!) направляется поток электронов. Все было бы хорошо, если бы электроны, собравшиеся было осесть на базе, не попадали в сильное электрическое поле коллектора, который находится очень близко от эмиттера. На коллектор от батареи *G2* подано сравнительно большое напряжение (несколько вольт или даже десятков вольт). Оно приложено в направлении, обратном для коллекторного *p-n* перехода, поэтому собственного тока через коллекторный переход практически нет. Но есть эмиттерный ток, и электроны, попадая в поле коллектора, направляются к нему и создают ток в коллекторной цепи. У современных транзисторов коллектор «перехватывает» более 99% всех электронов, излучаемых эмиттером. Следовательно, «коэффициент перехвата», равный отношению коллекторного тока к эмиттерному, $h_{21б} = 0{,}99$ или даже больше. Он называется коэффициентом передачи тока в схеме с общей базой или коэффициентом передачи тока эмиттера. Действительно, в данной схеме включения базовый электрод является общим и для эмиттерной, и для коллекторной цепей. В саму же базу попадает всего $1 - h_{21б}$, т.е. менее 1% тока эмиттера. Но вот что важно: и коллекторный, и базовый токи прямо пропорциональны току эмиттера, и если последний прекратится, то прекратится и коллекторный ток. Значит, эмиттерный ток управляет коллекторным! Но где же усиление? В этой схеме усиления по току действительно нет. Тем не менее можно получить усиление по напряжению и по мощности, если в цепь коллектора включить не измерительный прибор (миллиамперметр), как показано на рисунке, а резистор нагрузки с достаточно большим сопротивлением. Тогда изменения коллекторного тока вызовут изменения падения напряжения на нагрузке тем большие, чем больше ее сопротивление.

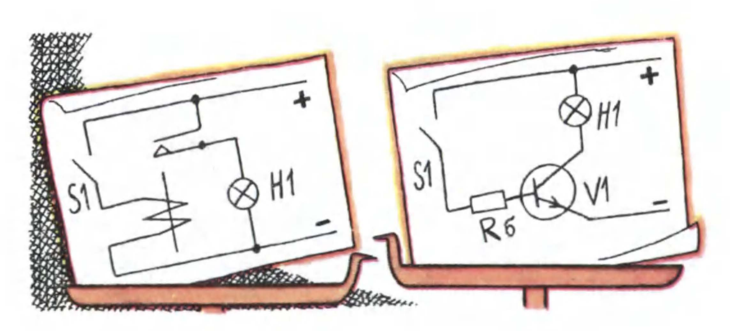
Но существует и другая, наиболее распространенная схема включения транзистора – с общим эмиттером. Здесь отпирающее напряжение подается на базу. Переход база – эмиттер, как и прежде, отпирается, и эмиттер испускает носители заряда – электроны. Если обозначить ток эмиттера $i_э$, то ток базы соста́вит $(1 - h_{21б})\, i_э$, а ток коллектора – $h_{21б} i_э$.



Включение по схеме с общим эмиттером

Найдем отношение тока коллектора к току базы: $i_к/i_б = h_{21б}/(1 - h_{21б})$. Его значение около 100. Оно называется коэффициентом передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21э}$ или коэффициентом передачи тока базы. Ток коллектора непосредственно зависит от тока базы: чем больше $i_б$, тем больше и $i_к$. Тут опять происходит управление большим током коллектора с помощью малого тока базы. Если в цепь базы включить источник сигнала, то такой же сигнал, но уже значительно усиленный, выделится и на резисторе нагрузки $R_н$ в коллекторной цепи. Именно так и устроены простейшие транзисторные усилители сигналов. Никаких накаленных катодов, никаких баллонов, откачанных до глубокого вакуума – транзистор представляет собой крошечный элемент с тремя проволочками-выводами. И напряжения питания требуются небольшие – всего несколько вольт. По массе, габаритным размерам и потребляемой мощности транзистор не идет ни в какое сравнение со своей предшественницей – электронной лампой.

Транзисторы, собственно, открыли возможность микроминиатюризации аппаратуры. С одной стороны, микроминиатюризация, а с другой ... Допустим, вы столкнулись с конкретной технической задачей: надо сделать выключатель для очень мощного потребителя тока, скажем лампы прожектора, электродвигателя дрели или станка. Потребляемый ток – несколько ампер. У вас нет выключателя с такими контактами. Что делать? Долгое время подобные задачи решались традиционным способом – использовали электромеханическое реле. Маломощный выключатель замыкает цепь обмотки реле. Обмотка потребляет сравнительно небольшой ток, поэтому и выключатель можно взять маломощный, и провода, ведущие к нему, могут быть длинными и тонкими. Когда ток идет через обмотку, сердечник намагничивается и притягивает якорь, а тот, в свою очередь, замыкает контакты. Все переменилось с разработкой мощных транзисторов. Когда цепь базы разомкнута, ток базы равен нулю, следовательно, отсутствует и ток коллектора. Лампа прожектора *H1* не горит. Замыкая контакты выключателя *S1*, мы включаем ток базы, и через лампу идет коллекторный ток, заставляя ее гореть. Ток базы может быть в сто раз меньше тока коллектора, и наш маломощный выключатель оказывается вполне пригодным. У транзисторного реле нет обгорающих контактов, нет трудоемкой в изготовлении обмотки, да и вообще нет движущихся элементов.



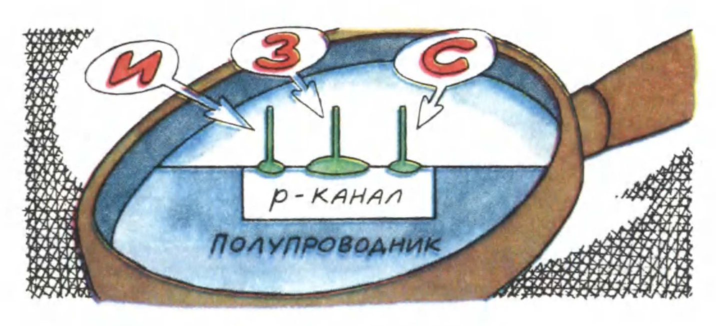
Электромеханическое и транзисторное реле

Если электромеханическое реле может выдержать несколько тысяч или десятков тысяч включений, то срок службы транзисторного реле практически ничем не ограничен. Теперь подобные транзисторные реле используют в автомобилях. Для подобных же целей разработаны и еще более совершенные полупроводниковые выключатели – тиристоры. Тиристор может находиться только в одном из двух состояний; либо «включено», либо «выключено». В первом случае он оказывает минимальное сопротивление проходящему через него току, а во втором – практически полностью размыкает цепь. Для переключения тиристора во включенное состояние достаточно небольшого и весьма маломощного импульса напряжения, подаваемого на управляющий электрод.

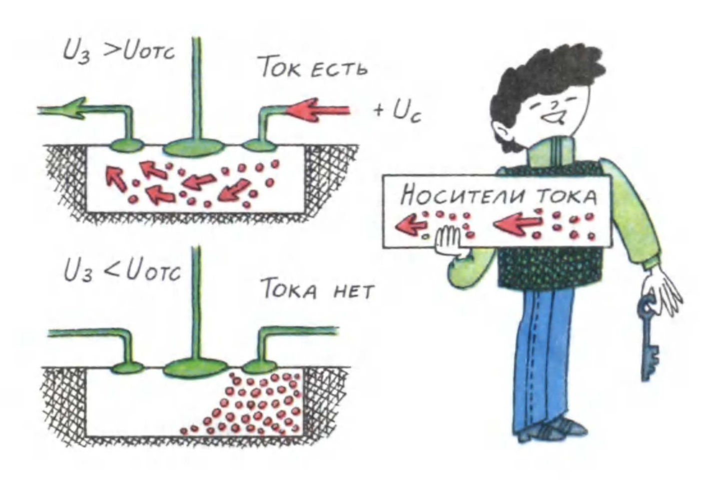
Специалисты долгое время относились с недоверием к полупроводниковым силовым устройствам, опасаясь их малой надежности. Сейчас эти опасения остались в прошлом. Не зря одна из фирм США в рекламном проспекте изображала полупроводниковый блок питания с лежащим поверх него ломиком-гвоздодером! По надежности, мощности и долговечности эти два «устройства» вполне сопоставимы.

После более чем десятилетнего безраздельного господства в электронике только что описанных транзисторов (названных биполярными) у них появился конкурент. Он, собственно, и дал обыкновенному транзистору новое название – «биполярный транзистор», которое подчеркивает этим наличие у обычного транзистора «двух полюсов» – контактов с различными типами проводимости. Новый транзистор, изобретенный У. Шокли, назван униполярным или полевым. «Полевым?» – спросит читатель. Бывают полевые цветы, полевые работы, полевая артиллерия, наконец! А что такое полевой транзистор? Свое название полевой транзистор получил от электрического поля, принимающего самое непосредственное участие в его работе.

Устройство полевого транзистора несложно. На поверхности чистого полупроводника с помощью примеси формируют токопроводящий канал *p*- или *n*-типа. От концов канала сделаны выводы, называемые истоком (аналог эмиттера) и стоком (аналог коллектора). В середине сечение канала сужается, и в этом месте сделан еще один вывод – затвор. Проводимость затвора противоположна проводимости канала. Более того, на затвор подают запирающее напряжение смещения, и ток через затвор отсутствует. Получился



Полевой транзистор



Поле затвора сужает канал и запирает транзистор

полевой транзистор с *p-n* переходом. В других конструкциях затвор вообще изолирован от канала тонким (доли микрометра) слоем диэлектрика. Это – полевой транзистор с изолированным затвором. Как же работает полевой транзистор? Когда на сток подано напряжение питания, через канал проходит некоторый ток i_c, обусловленный движением носителей – электронов (в канале *n*-типа) или дырок (в канале *p*-типа). Запирающее поле затвора сужает канал, увеличивая его сопротивление. Чем больше запирающее напряжение на затворе, тем меньше становится эффективное сечение канала, сквозь которое движутся носители тока. Общий ток стока при этом, естественно, уменьшается. При напряжении на затворе, равном напряжению отсечки $U_{отс}$, ток стока прекращается совсем. Описанные процессы очень похожи на явления, происходящие в электровакуумной лампе – триоде, с той лишь разницей, что происходят они не в вакууме, а в толще полупроводника.

На рисунке показана схема включения полевого транзистора. Рядом приведена характеристика зависимости тока стока от напряжения на затворе. Если напряжение на затворе изменяется в соответствии с усиливаемым сигналом, то по такому же закону изменяется и ток стока. На резисторе нагрузки $R_н$ выделяется усиленное напряжение сигнала.

Важным достоинством полевого транзистора является его исключительно высокое входное сопротивление – ведь цепь затвора никакого тока практически не потребляет (еще одно сходство его с электронной лампой). Правда, коэффициент усиления по напряжению полевого транзистора, как правило, несколько меньше, чем у биполярного. В последние годы разработаны полевые транзисторы для самых различных устройств – и для сверхчувствительных ультракоротковолновых приемников, и для мощных усилителей звуковой частоты. Используют полевые транзисторы и в цифровых интегральных микросхемах, отличающихся особой экономичностью.

5–647

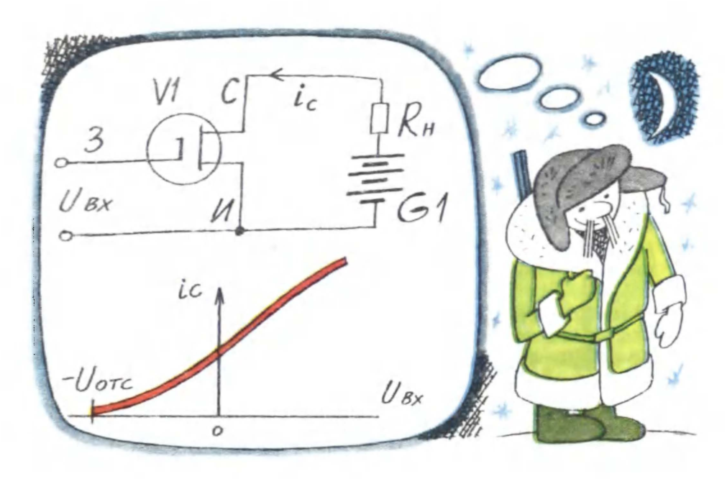
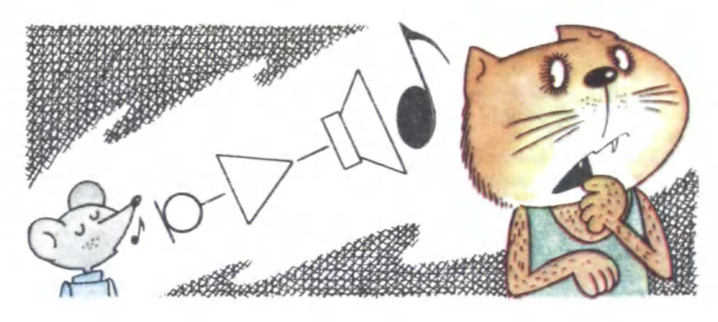


Схема включения и стоко-затворная характеристика полевого транзистора

Обрабатываем аналоговые сигналы

Что же можно сделать с аналоговым сигналом с помощью радиоэлектронных «кирпичиков» и зачем? Возьмем два простых примера. Перед микрофоном мышонок, он еле пищит, а требуется громко воспроизвести звук его «голоса». Значит, аналоговый сигнал после микрофона надо усилить. Другой пример: у мышонка надо измерить температуру. Обычный градусник не подходит – он больше самого мышонка, да и держать его мышонок не будет. Значит, надо воспользоваться электронным термометром. Что он собой представляет? Крохотную бусинку-термопару, укрепленную на конце термозонда. Достаточно таким термодатчиком прикоснуться к нагретому телу, как в термопаре, представляющей собой контакт двух проволочек, изготовленных из разных металлов, возникает термо-ЭДС. Она очень мала – часто не более долей милливольта. А для нормальной работы стрелочного или цифрового индикатора нужно напряжение примерно несколько вольт. Значит, выходной сигнал термопары надо усилить, по крайней мере, в 1000 раз. Тогда-то мы и получим возможность, на мгновение прикоснувшись термозондом к телу мышонка, отсчитать значение термоЭДС, пропорциональное температуре.

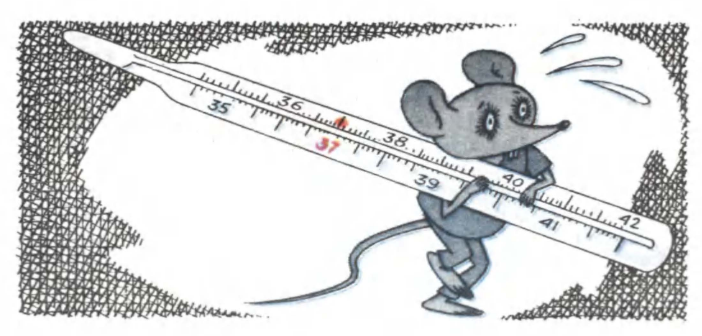
В описанных случаях нужны два принципиально разных усилителя. Звуковой сигнал – быстро изменяющийся процесс, состоящий только из колебаний. Ведь не требуется передавать значение атмосферного давления – надо преобразовать в электрическую форму и усилить лишь изменения давления. Соответственно и усилитель должен быть усилителем переменного тока. Диапазон усиливаемых им частот соответствует звуковому диапазону, и у хороших моделей он составляет 20 Гц ... 20 кГц. Иная ситуация возникает при усилении сигнала термодатчика. Если мышонка не дразнить и не пугать, его температура останется неизменной. Постоянной будет и



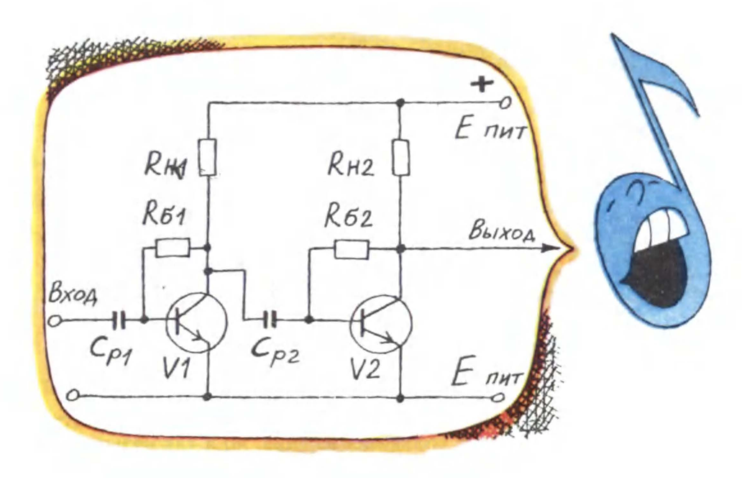
Усиление звуковых колебаний

термоЭДС датчика. Следовательно, здесь нужен усилитель постоянного тока, усиливающий не только изменения, но и так называемую постоянную составляющую подводимого к его входу сигнала.

Усилители переменного тока, как правило, проще, надежнее и стабильнее усилителей постоянного тока. Как включить транзистор, чтобы он работал как усилитель, мы уже знаем. Для увеличения коэффициента усиления соединяют последовательно несколько каскадов, как показано на рисунке. Каждый каскад такого усилителя содержит транзистор, два резистора и разделительный конденсатор. Первый резистор $R_{б1}$ создает некоторый начальный ток базы, который называют током смещения. Транзистор этим током «выводится» на линейный участок характеристики и становится способным усиливать как положительные, так и отрицательные полуволны входного сигнала. Слова «линейный участок характеристики» имеют следующий смысл: выходной сигнал усилительного каскада пропорционален входному, что и требуется для усиления без искажений. Ток коллектора, проходя через резистор нагрузки $R_{н1}$, создает на нем некоторое падение напряжения, которое изменяется в такт с изменениями входного сигнала. Обычно режим работы транзистора (т. е. токи электродов) подбирают таким, чтобы на резисторе нагрузки выделялось постоянное напряжение, равное половине напряжения питания. Тогда ток через транзистор может изменяться (при изменениях входного сигнала) от нуля до удвоенного значения при отсутст-



Как измерить температуру мышонка?



Двухкаскадный усилитель переменного тока

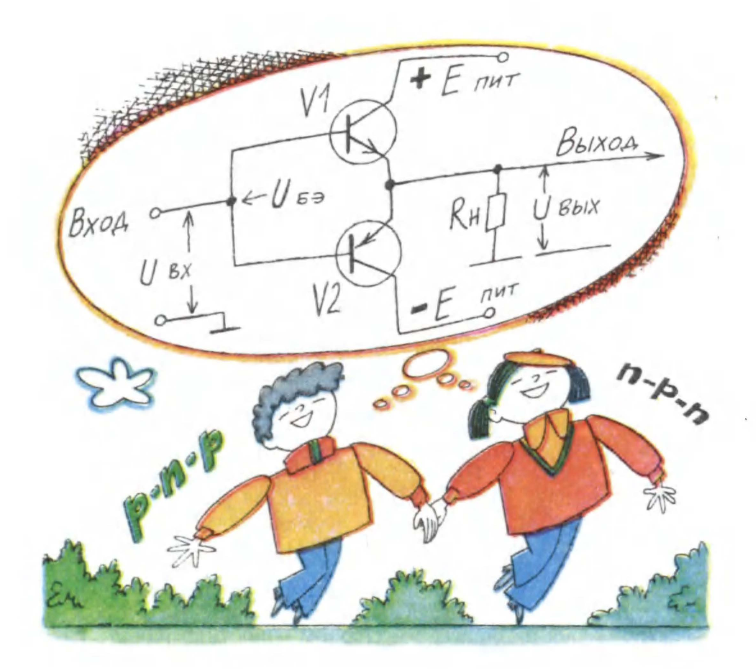
вии тока сигнала. При этом амплитуда снимаемого с нагрузки сигнала может достигать половины напряжения питания.

Существует много разновидностей усилителей переменного тока. Для увеличения размаха и мощности выходного сигнала резистор нагрузки усилительного каскада иногда заменяют трансформатором. Сопротивление его обмотки для постоянного тока мало́, и на коллектор транзистора поступает практически полное напряжение источника питания. А для переменного тока индуктивное сопротивление трансформатора велико, в результате и усиление получается значительным. Часто используют двухтактные усилители мощности. В них положительная полуволна входного сигнала усиливается одним транзистором, а отрицательная – другим. В результате возрастают КПД и выходная мощность усилителя.

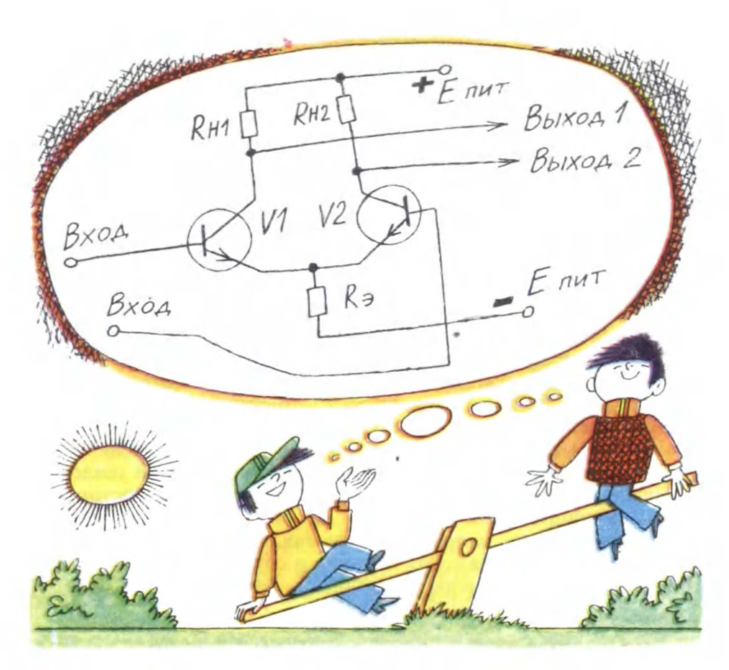
Но давайте вернемся к усилителям постоянного тока. Проектирование их всегда было большой проблемой. Часто предпочитали даже такой сложный путь: преобразовывали входной сигнал постоянного тока в переменный, усиливали получившийся переменный ток и затем снова выпрямляли (детектировали). Положение изменилось после разработки транзисторов с различными типами проводимости. Мы до сих пор рассматривали только транзистор структуры *n-p-n*. Отпирающее напряжение на его базе должно быть положительным. Напряжение такой же полярности надо подавать и на коллектор. Но бывают транзисторы и *p-n-p* типа, требующие напряжений другой полярности. Более того, они были и разработаны первыми и многие годы применялись почти исключительно во всех электронных устройствах. Кристаллы для этих транзисторов изготавливались из германия. В последние годы германиевые транзисторы практически полностью вытеснены кремниевыми, имеющими лучшие параметры и лучшую температурную стабильность. К тому же сырье для германиевых транзисторов дорого и его не хватает. Сейчас, вводя различные примеси, делают кремниевые транзисторы любого типа проводимости.

Пару транзисторов с различными типами проводимости, но примерно с одинаковыми параметрами (мощностью, коэффициен-

том передачи тока) называют комплементарной парой. Эта «дружная» пара открыла новые возможности для создания эффективных усилителей с высоким КПД. Вот, например, как выглядит простейший усилитель мощности на комплементарной паре транзисторов. Для него нужны два источника питания с одинаковыми напряжениями, но различными полярностями $+E_{пит}$ и $-E_{пит}$. Это недостаток, но он с лихвой окупается многими достоинствами усилителя. На вход можно подавать сигнал как положительной, так и отрицательной полярности. В первом случае отпирается верхний, *n-p-n* транзистор, и в нагрузку $R_н$ течет ток положительной полярности. Во втором – отпирается нижний, *p-n-p* транзистор, и в нагрузку течет ток отрицательной полярности. Если же входной сигнал отсутствует, то оба транзистора закрыты и от источников питания не потребляется почти никакой мощности. Этим и объясняется высокий КПД усилителя. Напряжение сигнала описываемый усилитель не увеличивает. Действительно, при усилении положительной полуволны входного сигнала транзистор *V1* должен быть открыт, т.е. напряжение между его базой и эмиттером $U_{БЭ} = U_{вх} - U_{вых}$ должно быть положительным. А это значит, что выходное напряжение $U_{вых}$ будет меньше входного $U_{вх}$. То же самое произойдет и при усилении отрицательной полуволны сигнала, когда откроется транзистор *V2*, только знаки напряжений изменятся на обратные. Коэффициент передачи усилителя по напряжению составляет в зависимости от типов транзисторов, напряжения питания и сопротивления нагрузки 0,8...0,99, т.е. немного меньше единицы. Зато ток в нагрузке, а



Комплементарная пара и усилитель на комплементарных транзисторах



Дифференциальный транзисторный каскад и мальчики, образовавшие «дифференциальную» пару

следовательно, и мощность могут быть намного больше, чем ток и мощность сигнала, действующего на входе усилителя. Чтобы подчеркнуть тот факт, что выходное напряжение примерно повторяет входное, часто такой каскад называют комплементарным (составным) эмиттерным повторителем.

Проблему усиления мощности, т.е. вопрос проектирования выходного каскада усилителя постоянного тока, мы решили. Но надо ведь усиливать и напряжение! Обычный, уже разобранный нами усилительный каскад на одном транзисторе здесь малопригоден, поскольку на его коллекторной нагрузке выделяется большое постоянное напряжение, не зависящее от сигнала. Его надо как-то компенсировать, да к тому же оно изменяется при колебаниях напряжения питания, изменениях тока транзистора из-за нагрева и многих других факторов. На выручку приходит дифференциальная схема включения двух транзисторов, показанная на рисунке.

Когда двое ребят качаются на доске-качелях, их движения взаимосвязаны; если один опускается вниз, другой летит вверх. Дифференциальный каскад действует подобным же образом. Если на базу одного транзистора подан открывающий положительный потенциал, ток через этот транзистор возрастает. Возрастает и падение напряжения на общем эмиттерном сопротивлении $R_э$, следовательно, потенциал эмиттеров обоих транзисторов тоже повышается. Но потенциал базы второго транзистора остался неизменным, значит, второй транзистор будет закрываться. Сумма коллек-

торных токов обоих транзисторов остается неизменной, но сами токи могут изменяться (один уменьшаться. другой увеличиваться), как и высота подъема ребят на качелях. У дифференциального каскада два входа, причем реагирует он на разность потенциалов между входами. Синфазные же изменения входных напряжений, так же как и напряжений питания. уже значительно меньше влияют на работу каскада. Выходной сигнал снимают с обоих выходов или же с любого из них. Дифференциальные каскады с эмиттерной связью очень широко применяются в электронной технике.

К сожалению, в одной книге нет возможности рассмотреть громадное многообразие схемотехнических решений, используемых в современной электронике. Читатели, интересующиеся вопросами построения транзисторных схем, когда потребуется, могут обратиться к специальной литературе, которая, во всяком случае в библиотеках, имеется в избытке. А пока пойдем дальше. Выше мы без тени сомнений использовали по два транзистора в устройствах, где, казалось бы, можно обойтись и одним. Двадцать лет назад применение двух ламп вместо одной было целым событием. С появлением полупроводниковой технологии положение совершенно изменилось. Все реже транзисторы и другие детали электронных схем можно увидеть в виде отдельных, как говорят, дискретных элементов. Дело в том, что сейчас уже всю схему усилителя можно выполнить на одном кристалле полупроводника! Вот как это делается.

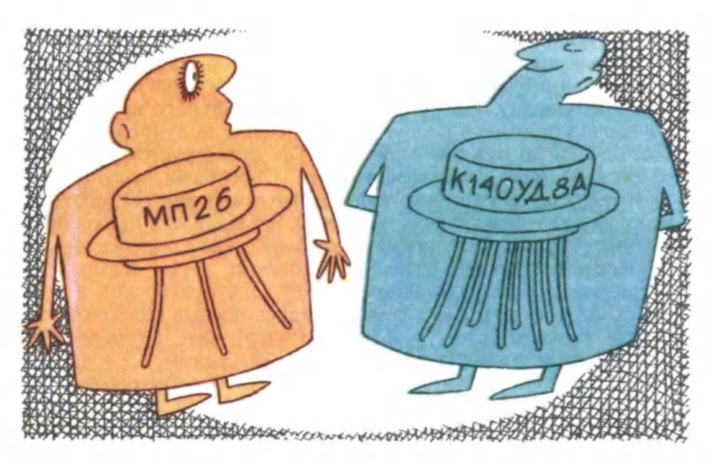
Интегральная технология

На одном кристалле чистого полупроводника можно изготовить много транзисторов. И они не будут «мешать» друг другу или взаимодействовать между собой, ведь чистый полупроводник плохо проводит электрический ток. Добавляя в нужных местах микроскопические капельки примесей, можно получать транзисторы с их эмиттерными и коллекторными переходами. Для нужной схемы транзисторы надо соответствующим образом соединить друг с другом. Напылим между нужными точками микроскопические дорожки из металла, и соединительные проводники готовы! Если в соединительный проводник вмонтирован резистор, напылим металла поменьше, слой будет тоньше, чтобы сопротивление проводника равнялось требуемому. Или в разрыв соединительного проводника введем капельку примеси, чтобы сопротивление полупроводника в этом месте достигло нужной величины. Так формируется резистор. Труднее обстоит дело с конденсаторами. Способами полупроводниковой интегральной технологии они не изготавливаются, поэтому часто используют гибридную технологию, напыляя или прикрепляя другим способом, микроскопические керамические конденсаторы в нужных местах микросхемы. Все это, конечно, легко сказать, но нелегко сделать. Ушли годы напряженной конструкторской и изобретательской работы, прежде чем появились первые интегральные микросхемы. Разумеется, их невозможно изготовить вручную. Отполированный кристаллик кремния размерами, скажем, 1,5 × 1,5 мм закрепляется на координатном столике фотолитографической установки. На поверхность кристалла уже нанесен слой специального вещества – фоторезиста. Изображение деталей или проводников мощным объективом проецируется на кристалл, включается кварцевая лампа – происходит экспонирование. Затем неэкспонирован-

ные места вытравливаются кислотами – образуется рельефный рисунок будущей микросхемы.

Вводятся примеси. Способов много – например, ионная имплантация. В вакуумной камере мощная «пушка» излучает поток ионизированных атомов примеси. Лучик их очень узок, измеряется микрометрами. Длительность экспонирования определяет количество введенной примеси. Или, например, диффузионный способ. На кристалл наносят строго дозированные микроскопические капельки примеси, и затем кристалл нагревается в электроиндукционной печи и расплав примеси диффундирует в толщу полупроводника на строго заданную глубину. Есть множество хитроумных и сложных технологических процессов, в результате которых и получается современная интегральная микросхема. Производство их сложно, но уж если поточная линия и все технологические процессы отлажены, микросхемы можно «штамповать» десятками тысяч, и все затраты с лихвой окупаются. Разработана так называемая групповая технология, с помощью которой на одной кремниевой пластине сразу изготавливают сотни микросхем.

На рисунке показаны, как говорится, «год нынешний» и «год минувший». Одинаковые металлические корпусы диаметром 10 и высотой 8 мм. Различить детали внешне можно только по числу выводов и по маркировке на корпусе. Слева транзистор МП26 выпуска 1971 года. У него всего три вывода. Он может усилить сигнал в 30 раз, можно на нем построить генератор. Правда, в обоих случаях надо еще десяток внешних элементов, главным образом резисторов. Значит так: нужно разработать и изготовить печатную плату, сделать монтаж, наладить изготовленное устройство. И места оно займет порядочно... Справа интегральный операционный усилитель К140УД8А выпуска 1982 года. Восемь выводов. Коэффициент усиления 50 000. Вход практически не шунтирует источник сигнала – входное сопротивление более 1000 МОм (миллионов ом!). Выход, правда, маломощный (допустимое сопротивление нагрузки 2 кОм), зато и потребляемый от источников питания

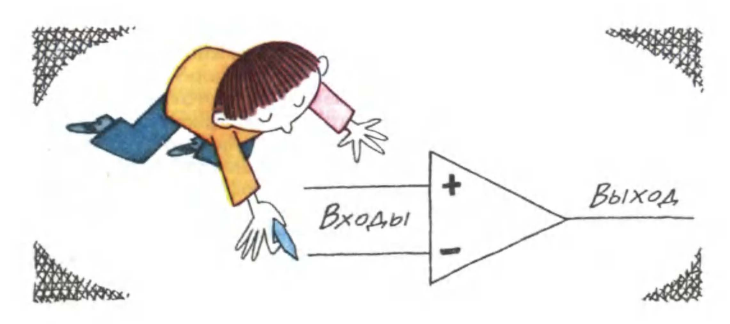


От биполярного транзистора к операционному усилителю

ток составляет всего 3 мА. Заметен прогресс? То ли еще будет, когда мы обратимся к цифровой технике. А пока подробнее об этом и подобных ему усилителях.

Операционный усилитель

Операционный усилитель – один из самых главных «кирпичиков» современной аналоговой электроники. Он спроектирован так, чтобы удовлетворить самым взыскательным требованиям разработчиков электронной техники. Вот его обозначение:



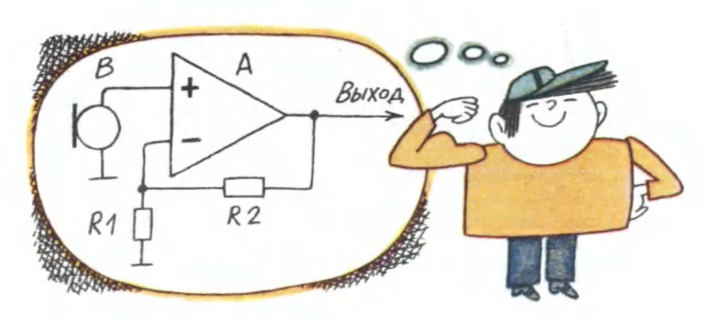
Операционный усилитель

У операционного усилителя два входа: неинвертирующий, обозначенный «+», и инвертирующий, обозначенный «–». Если на неинвертирующий вход подать положительный потенциал, то потенциал на выходе возрастет. Но если положительный потенциал подать на инвертирующий вход, потенциал на выходе уменьшится. А если одинаковый потенциал подать сразу на оба входа? Потенциал выхода не изменится. Как и полагается усилителю с дифференциальным входом, операционный усилитель реагирует только на разность потенциалов между входами и хорошо подавляет одинаковые сигналы на входах или, как говорят специалисты, синфазную составляющую входного сигнала.

При интегральной технологии нет нужды экономить на транзисторах. Если уж процесс изготовления отработан, то практически не имеет значения, сколько транзисторов расположено на пластинке полупроводника. Интегральная микросхема изготавливается с помощью станков-автоматов в едином технологическом процессе. Размеры самих транзисторов составляют микрометры, а размер кристалла – миллиметры. Поэтому и десять тысяч транзисторов для одной микросхемы – не предел. Это принесло большую пользу инженерам-проектировщикам микросхем и позволило воплотить в жизнь множество интересных и полезных схемотехнических решений. Например, при нагреве параметры одного транзистора изменяются, и его коллекторный ток возрастает. Значит, при нагреве надо уменьшить напряжение смещения транзистора. Это делает другой транзистор, включенный в цепь смещения. Более того, включим пару транзисторов по дифференциальной схеме. Тогда, несмотря на то, что ток обоих транзисторов при нагреве возрастает, разность токов, которая и определяет полезный выходной сигнал, практически не меняется.

Благодаря этому операционный усилитель оказывается термостабильным. Температурный «дрейф» его не превосходит нескольких десятков микровольт на градус, тогда как у усилителя на дискретных элементах он в десятки раз больше. Хотя термостабильность и достигается ценой применения в микросхеме десятков транзисторов, при интегральной технологии это никого не волнует. А вот начертить внутреннюю принципиальную схему современного интегрального усилителя оказывается непросто – по сложности она приближается к схеме, скажем, обычного телевизора! Но теперь уже нет необходимости интересоваться внутренним устройством усилителя – вполне достаточно знать его внешние параметры. А на схемах усилитель изображают просто треугольником, особо не задумываясь над тем, что у него внутри!

Рассмотрим на простых примерах, как можно использовать высокие собственные параметры операционных усилителей. Пример первый: нужно усилить напряжение звуковой частоты. Ранее мы научились строить усилители мощности на комплементарных транзисторах, а усилитель напряжения оставили «на потом». Сейчас это «потом» наступило, и вот перед вами простейшая схема усилителя напряжения. Источником сигнала служит микрофон, подключенный к неинвертирующему входу. Источниками могут быть и термопара, и детектор радиоприемника, и многое другое. Цепочка из двух резисторов *R1* и *R2* образует цепь обратной связи. Зачем она нужна? Польза от нее огромная. Собственный коэффициент усиления операционного усилителя очень велик, что на практике никогда не нужно. Но он позволяет ввести глубокую отрицательную обратную связь, а она резко снижает искажения усилителя и выравнивает его частотную характеристику. В результате усилитель вносит пренебрежимо малые искажения в очень широкой полосе частот, что как нельзя лучше соответствует современным требованиям к усилителям. Посмотрим на схему. Малейшая разность потенциалов между входами изменяет потенциал выхода. Последний передается снова на инвертирующий вход через делитель напряжения *R1R2*. Пусть, например, входной потенциал на неинвертирующем входе больше, чем на инвертирующем. Потенциал выхода немедленно увеличится и повысит через делитель потенциал инвертирующего входа. Если же на инвертирующем входе потенциал возрастет, то потенциал выхода уменьшится. Значит, напряжение на инвертирующем входе почти точно соответствует входному, а выходное напряжение в *R2/R1* раз больше. Что же получилось? Коэффициент усиления приведенного



Усилитель звуковых частот

усилителя определяется только отношением сопротивлений двух резисторов и не зависит от свойств самого операционного усилителя. Лишь бы он был близок к «идеальному», т. е. обладал как можно большим усилением. Следовательно, коэффициент усиления при наличии обратной связи очень стабилен и не подвержен изменениям при нагреве, колебаниях питающих напряжений и воздействии подобных факторов.

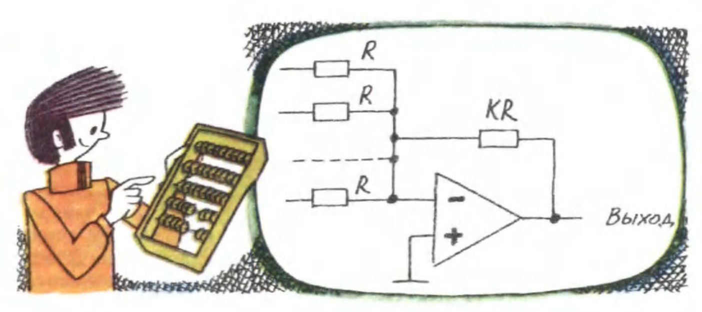
На операционном усилителе можно выполнить (или, как говорят, «собрать») много других устройств: генераторы напряжений прямоугольной или треугольной формы, интегратор, дифференциатор. сумматор сигналов и т. д.

Посмотрите, например, на схему сумматора. Все входы через одинаковые резисторы R присоединены к инвертирующему входу операционного усилителя. Сюда же подан сигнал обратной связи через резистор с сопротивлением KR. Значит, это устройство не только суммирует сигналы, но и усиливает их по напряжению в K раз. Неинвертирующий вход операционного усилителя соединен с общим проводом или, как говорят, он «заземлен».

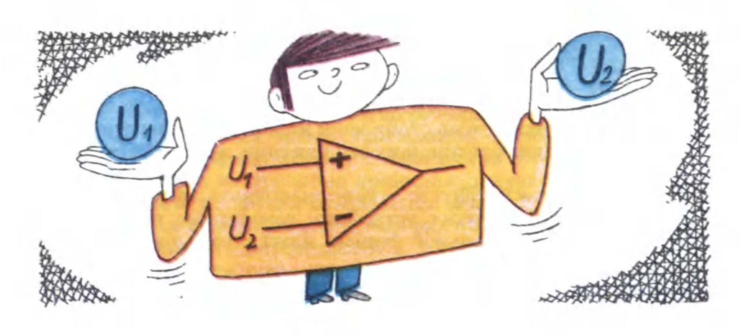
Но вернемся ко входам усилителя. Если на заземленном неинвертирующем входе нет сигнала, то его практически не будет и на инвертирующем. Куда он исчезнет? Скомпенсируется сигналом обратной связи. Например, напряжение сигнала в 1 мВ на любом из входов *1–3* вызовет появление напряжения K мВ на выходе. А на инвертирующем входе усилителя произойдет почти полная взаимная компенсация этих напряжений. Мы говорим «почти», имея в виду тот факт, что собственный коэффициент усиления операционного усилителя все-таки не бесконечен. Инвертирующий вход усилителя в этой схеме часто называют виртуальной или искусственной «землей», подчеркивая отсутствие на нем напряжения сигнала. Но если так, то источники сигнала оказываются независимыми и не мешают друг другу – сигнал одного источника никогда не попадет в другой. Получается полная «развязка» источников.

Еще одно применение операционного усилителя – в качестве компаратора, т. е. устройства для сравнения между собой двух различных величин, например напряжений. Пусть одно из этих напряжений подается на один вход усилителя, второе – на другой.

В этом устройстве нет отрицательной обратной связи и высокий собственный коэффициент усиления используется полностью. Если напряжение U_1 хотя бы немного (на несколько микровольт) больше напряжения U_2, то потенциал на выходе устройства принимает



Сумматор

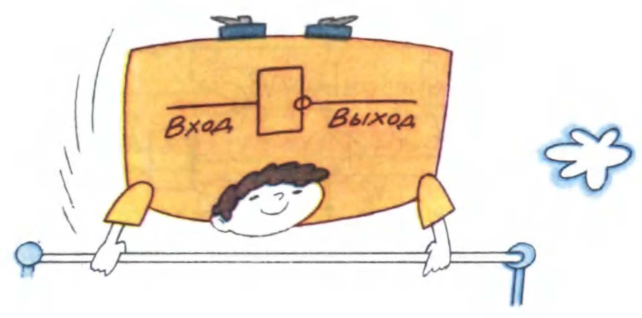


Компаратор

максимально возможное значение, несколько меньшее напряжения питания. В этом случае говорят, что усилитель «вошел в насыщение». Если же напряжение U_1 меньше U_2, то потенциал на выходе принимает такое же, но отрицательное значение. Следовательно, компаратор имеет «релейную» характеристику и выдает на выходе только два дискретных значения. Их можно назвать единица (1) и нуль (0) как это принято в цифровой технике. Да и сам компаратор чаще всего используют в устройствах для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, сокращенно АЦП, что означает аналого-цифровой преобразователь. Ну а раз уж мы заговорили о цифровой технике, то следует рассказать о ней подробнее. Многие другие аналоговые устройства: преобразователи частоты, модуляторы, детекторы, генераторы и т. д. – мы разберем на конкретных примерах в следующих главах. Итак...

Цифровые интегральные микросхемы

Все мы, часто не осознавая, стремимся в жизни к твердости, определенности и уверенности. Если «Да», так да, «Нет» – так нет. И в цифровой электронной технике разработчик и пользователь должны быть уверены: если устройство выдает на выходе «единицу», так это – единица, а не что-нибудь другое. Обычно 1 соответствует высокий уровень выходного напряжения, а 0 – низкий. Логические уровни 1 и 0 практически не должны зависеть от того, подключаем мы на выход устройства какую-нибудь нагрузку или нет. Отсюда следует, что одним из основных «кирпичиков» цифровой электроники должен быть усилитель, твердо устанавливающий на выходе значения логических уровней. Очень часто в цифровом сигнале бывает необходимо поменять значения уровней между собой, т. е. иметь на выходе 0, если на входе 1, и наоборот. Всеми этими свойствами обладает инвертор, на схеме условно обозначаемый прямоугольником, а кружок у выходного проводника означает инвертирование сигнала. Слово «усилитель» мы не зря поставили в кавычки, ведь усиления напряжения сигнала в цифровых микросхемах не происходит. Более того, все микросхемы одной серии проектируют с одним и тем же напряжением питания и одинаковыми логическими уровнями. Но выходной ток логического элемента, например инвертора, может быть значительно больше входного. В справочниках указывается коэффициент разветвления по выходу,

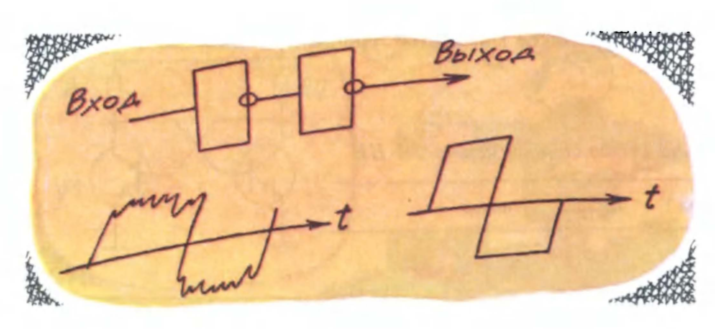


Инвертор

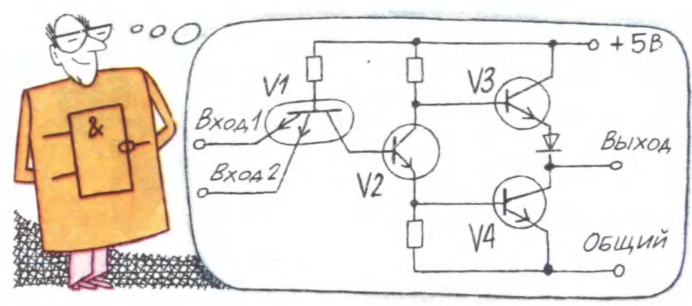
показывающий, сколько входов других элементов можно подсоединить к выходу данного элемента без нарушения работоспособности. Обычно он бывает около десяти.

Два инвертора, соединенные последовательно, точно повторяют цифровой входной сигнал. Они могут служить, например, регенератором телеграфного сигнала, искаженного помехами. Обратите внимание, насколько регенератор на логических элементах проще и надежнее электромеханического реле! Ну а что касается быстродействия, то тут и сравнивать нельзя. Если хорошее малоинерционное реле может переключаться 100, ну от силы 300 раз в секунду, то полупроводниковый инвертор способен переключаться десятки, а если он построен на особо быстродействующих микросхемах, то и сотни миллионов раз в секунду! Он способен обрабатывать сигналы с полосой до сотен мегагерц, т. е. передаваемые со скоростью сотни мегабит в секунду!

Значительно бóльшими логическими возможностями обладает двухвходовый инвертор, или элемент 2И–НЕ. Прежде чем описывать его работу, давайте рассмотрим устройство этого элемента, выбрав один из самых распространенных – К155ЛА3. Снаружи – это стандартный пластмассовый корпус с 14 выводами и с габаритными размерами 10 × 20 × 4 мм. Один вывод соединяется с общим проводом («массой», «землей»), на другой – подается напряжение питания + 5 В. Остальные выводы – входы и выходы элементов. Всего в



Регенератор цифрового сигнала



Элемент 2И-НЕ

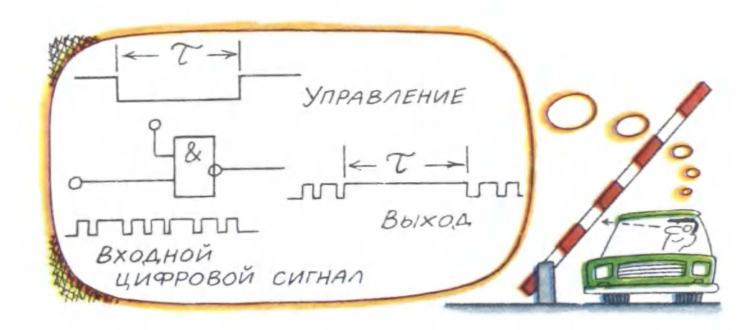
корпусе их четыре. Схема одного из элементов показана на рисунке. Сразу бросается в глаза необычный вид первого транзистора – у него два эмиттера, соединенные с двумя входами. Ничего удивительного, просто это – транзистор с двумя независимыми эмиттерами. Их может быть и больше. Например в элементе К155ЛА2 восемь входов и соответственно восемь эмиттеров у первого транзистора. Если хотя бы на один эмиттер подан низкий потенциал (логический 0) или просто вход соединен с общим проводом, через эмиттерный переход пойдет ток, и первый транзистор *V1* откроется, закрыв второй транзистор *V2*. При этом на базу транзистора *V3* будет подан ток, проходящий через резистор коллекторной нагрузки транзистора *V2*. Транзистор *V3* откроется. В это время *V4* будет закрыт, поскольку ток базы у него отсутствует. На выходе элемента окажется высокий уровень напряжения (логическая 1). Если же на всех входах будет высокий уровень напряжения, транзистор *V2* откроется, открывая и *V4*, а *V3* будет закрыт из-за большого падения напряжения на коллекторной нагрузке транзистора *V2*. На выходе элемента будет низкий уровень напряжения (логический 0).

Сейчас уже редко пользуются принципиальными схемами микросхемы. Предпочитают нарисовать прямоугольник – условное обозначение элемента, а рядом – таблицу его состояний в зависимости от уровней напряжений на входах. Обратите внимание на значок в левом верхнем углу. Он означает, что элемент работает именно так, как указано в таблице. Элементы, действующие в соответствии с другой таблицей состояний, обозначаются и другими значками.

Какие устройства можно выполнить на двухвходовом элементе & (2И–НЕ)? Великое множество. Например, выключатель сигнала.

Таблица состояний элемента 2И-НЕ

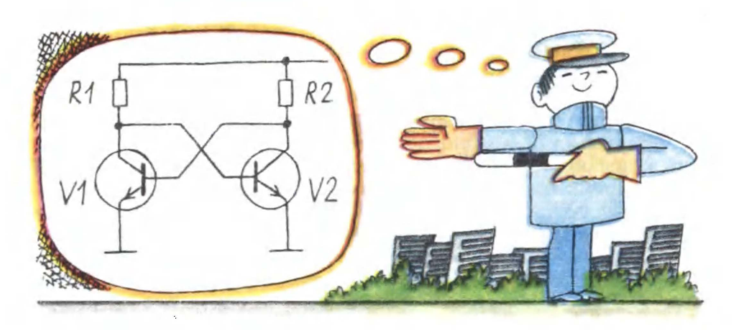
Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



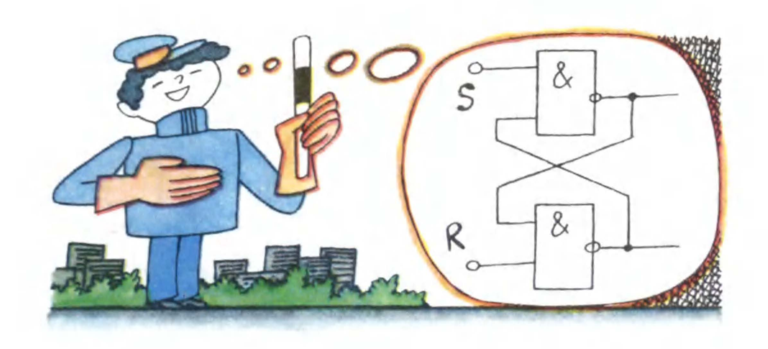
Коммутатор цифрового сигнала на двухвходовом элементе 2И-НЕ

Пусть на один вход поступает цифровой сигнал. Если на другой вход подать логическую 1, то на выходе выделится инвертированный сигнал. А если на другой (управляющий) вход подать 0? На выходе будет 1, и цифровой сигнал через инвертор не пройдет.

Другой интересный элемент цифровой электроники – триггер. Поскольку многие слова, и это в том числе, пришли в электронику из английского языка, полистаем англо-русский словарь. Trigger – защелка, спусковой крючок. Сразу всплывают в памяти рассказы об охотниках, индейцах... Стараясь не шуметь, не наступить ненароком на сухую ветку, пробираемся по звериной тропе. Цель где-то близко. Осторожно взводим курок ружья. Слабый щелчок, и курок остался во взведенном положении. Спусковой механизм смазан и отрегулирован, теперь достаточно легкого нажима на спусковой крючок, и курок вернется в исходное положение – грянет выстрел! Итак, триггер является устройством, которое может находиться в двух устойчивых состояниях: взведен – 1, спущен – 0. Причем в каждом из состояний триггер может пребывать как угодно долго, и никаких внешних воздействий для поддержания этого состояния не требуется. Внешнее воздействие нужно только для переключения триггера из одного состояния в другое. Собственно, свойствами триггера обладает выключатель электрической лампы в вашей комнате. Но и в охотничьем ружье, и в выключателе триггерными



Триггер на транзисторах

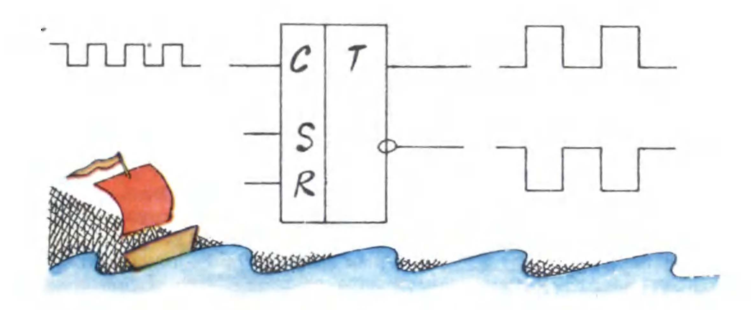


R-S-триггер на элементах 2И-НЕ

свойствами наделены механические устройства с крючками, защелками и пружинами. А вот и схема простейшего триггера на двух транзисторах – без всяких пружин и механических движущихся частей. Если транзистор *V1* открыт, то его коллекторный ток создает большое падение напряжения на коллекторной нагрузке *R1*, следовательно, коллектор *V1* и база *V2* имеют низкий потенциал. Значит, транзистор *V2* закрыт, а ток через резистор *R2* идет к базе транзистора *V1*, открывая его полностью, до насыщения. Чтобы «перебросить» триггер в другое состояние, достаточно приоткрыть транзистор *V2* коротким импульсом напряжения, поданным на его базу. Появится коллекторный ток, напряжение на коллекторе *V2* уменьшится, что приведет к закрыванию транзистора *V1* и к еще большему открыванию транзистора *V2*. Этот лавинообразный процесс переключит триггер в другое устойчивое состояние, когда транзистор *V1* закрыт, а *V2* полностью открыт.

Триггер можно выполнить и на двух уже рассмотренных нами логических элементах – инверторах. Два входа соединяются крест-накрест с выходами элементов, а два других входа можно использовать как установочные. Вход *S* – вход установки 1. Если этот вход соединить с общим проводом, то на выходе верхнего элемента появится уровень 1. Этот уровень, действуя на вход нижнего элемента, установит 0 на его выходе, а значит, и на втором входе верхнего элемента. Триггер «защелкнется» и будет находиться в этом состоянии до тех пор, пока на вход *R* – вход «сброса» – не будет подан сигнал логического 0. Тогда триггер переключится, и на верхнем (по схеме) выходе установится низкий уровень 0, а на нижнем – высокий уровень 1. Триггер с раздельными входами называют *R*–S-триггером. Оба элемента удобно объединить в одной микросхеме, так обычно и делают. Более того, триггер оснащают еще и входной логикой, позволяющей включать его в разных режимах работы. Например, делают совместно с *R*- и *S*-входами счетный вход *C*. При поступлении импульса на счетный вход триггер переключается в состояние, противоположное тому, в котором он был ранее.

Пользуясь счетным входом, очень просто осуществить деление частоты поступающих импульсов на два. Вот как это делается. Входы *S* и *R* не использованы, а на счетный вход подана последовательность импульсов. Триггер переключается каждым отрицатель-

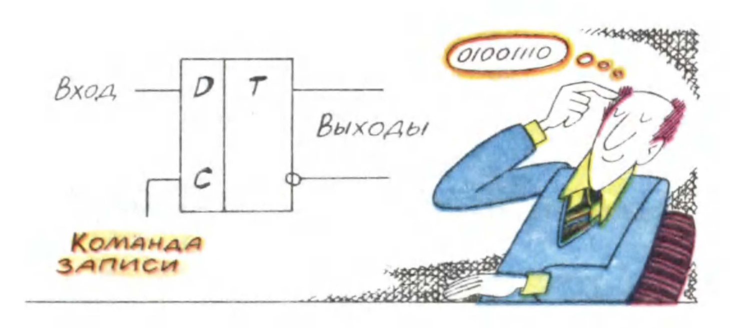


Делитель частоты на два

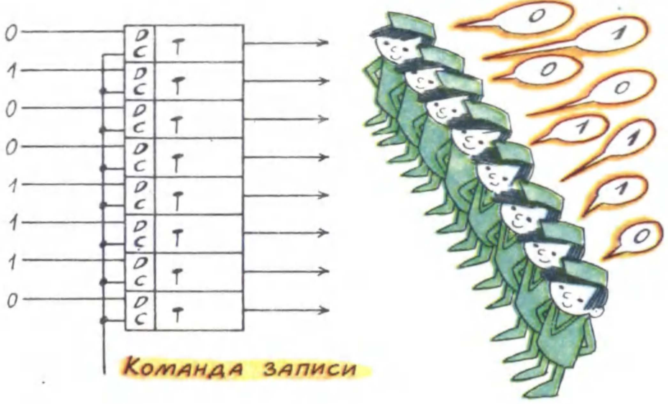
ным перепадом входного сигнала, в результате на выходе импульсы следуют вдвое реже, чем на входе.

Сконструирован *D*-триггер – прекрасное устройство запоминания информации. На вход *D* подается исходный сигнал, но состояние триггера не изменится до тех пор, пока на вход *C* не будет подан импульс – команда записи. Тогда на выходе триггера установится такой же уровень, какой был на входе в момент записи. Это состояние не изменится, пока на вход *C* не будет подана новая команда. Предположим, что нам надо записать некоторое число в двоичном коде, например 01001110. Каждый разряд этого числа передается по отдельному проводу (так называемый параллельный ввод). Мы подключаем все провода к *D*-входам триггеров, а все входы *C* соединяем вместе. На эту шину подается команда записи. Все триггеры устанавливаются в состояние, соответствующее уровням на входах *D*, и число записано. Оно будет храниться неограниченно долго, пока на входы *C* не подадут новую команду для записи другого числа.

А что делать, если информация поступает последовательно, по одному-единственному входу? Последовательно вводимую информацию тоже можно записать с помощью триггеров, только соединить их следует по-другому. Представьте шеренгу солдат, застывших в строю. Звучит команда: «По порядку номеров рассчитайсь!» – «Первый, второй, третий» и т. д. Каждый из солдат по очереди объявляет свой номер, и «точка счета» бежит вдоль строя до самого

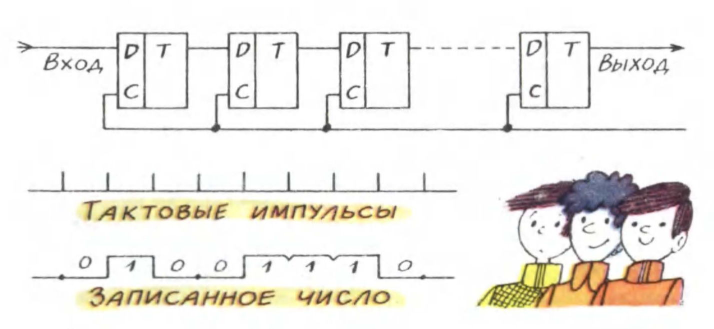


D-триггер



Параллельный регистр

его конца. Подобным образом действует и ряд последовательно соединенных Д-триггеров, образующих регистр сдвига. Триггеры в регистре организованы еще лучше, чем солдаты в строю. Каждый из солдат выкрикивает свой номер после того, как крикнет предыдущий, причем задержка в счете зависит от индивидуальных качеств каждого – кто-то среагировал быстро, а кто-то задумался и крикнул свой номер с опозданием. Посмотрим теперь на схему триггерного регистра сдвига. На шину записи поступает команда – тактовый импульс. Каждый триггер записывает ту информацию, которая была в предыдущем триггере. Значит, записанная информация (двоичное число) не изменилась, просто все разряды сдвинулись на один шаг вправо. В этот же момент в первый триггер (крайний слева на схеме) можно записать новый разряд числа. Таким образом, для записи упомянутого 8-разрядного двоичного числа нужно восемь триггеров. Тактовые импульсы подаются вместе с поступлением разрядов числа, и после восьмого тактового импульса триггеры устанавливаются в состояние (слева направо) 01001110. Запись закончена. Надо считать число? Подведем еще восемь тактовых



Регистр сдвига

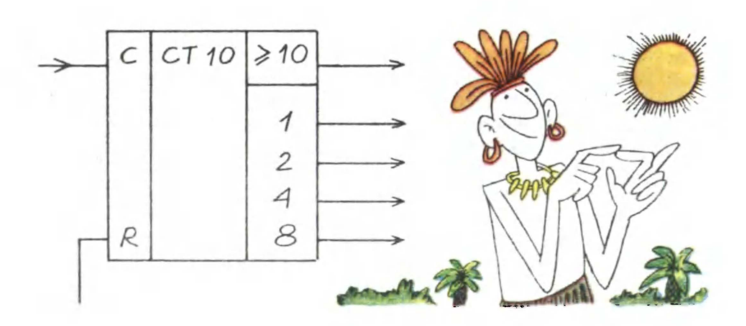
импульсов, и на выходном проводе в такт с подаваемыми импульсами появляется информация. Надо вывести информацию в параллельном двоичном коде? Просто сделайте выводы от выхода каждого из триггеров.

Мы уже говорили, что при интегральной технологии в одном корпусе можно разместить очень много транзисторов, объединенных в логические элементы, триггеры и другие устройства. Поэтому выпускаются уже готовые регистры сдвига на восемь, шестнадцать и более разрядов.

На триггерах легко выполняются и другие устройства цифровой техники, например счетчики импульсов. Не буду утруждать читателя детальным описанием их устройства, расскажу только о входах, выходах и работе одного из самых распространенных счетчиков – двоично-десятичного. Основу его составляют четыре счетных триггера, соединенных последовательно. Первый триггер перебрасывается каждым входным импульсом, второй – каждым вторым, третий – каждым четвертым, и т. д. Таким образом, четыре триггера могут считать до шестнадцати, а пять – до тридцати двух.

Двоичный способ счета у нас не принят, а в повсеместном ходу десятичная система. Поэтому и в десятичном счетчике возможности четырех триггеров полностью не используются, и после установки состояния 1010 на специальном выходе счетчика появляется импульс для переноса в следующий счетчик или следующую декаду. Вот условное изображение двоично-десятичного счетчика. На вход *C* поступают импульсы, которые нужно сосчитать. Вход *R* используют для сброса всех триггеров счетчика в нулевое состояние. На выходе $\geqslant 10$ появляется импульс с приходом каждого десятого входного. А на выходах *1–8* в параллельном двоичном коде появляется сосчитанное число импульсов. Разработаны и более сложные счетчики. У некоторых есть входы предварительной установки, позволяющие начать счет не с нуля, а с любого наперед заданного числа. Есть реверсивные счетчики, позволяющие считать и «туда» и «обратно», т. е. как в сторону увеличения записанного числа, так и в сторону его уменьшения. Все типы счетчиков можно соединять последовательно для счета и записи многоразрядных чисел.

Рассказ о цифровой технике можно продолжать еще и еще, но, по-моему, пока на этом можно остановиться, ведь мы к ней еще не раз вернемся, главным образом в главе о вычислительной технике.



Десятичный счетчик

6. РАДИОВЕЩАНИЕ

В этой главе автор рассказывает об устройстве детекторного приемника, становлении радиовещания в нашей стране, строительстве мощных радиостанций и выпуске массовых радиоприемников, о современном состоянии радиовещания и перспективах на ближайшее будущее, связанных, разумеется, с цифровой электроникой и космической техникой.

Немного истории

Рассказывая об истории радио, мы с вами остановились на том времени, когда искровые радиопередатчики и приемники с когерером достигли предела своих возможностей. Нужна была новая техника, позволявшая увеличивать и дальность, и качество радиосвязи. И новая техника возникла – ведь возможности радио заинтересовали многих, появилось немало талантливых инженеров и техников, работавших над ее совершенствованием. В 1906–1908 годах изобрели два новых прибора, до настоящего времени остающихся чуть ли не основными в радиотехнике.

Первый из них – кристаллический детектор. Его предшественник – когерер – обладал очень малой чувствительностью. Естественно, что трубку, заполненную железными опилками, пытались усовершенствовать многие конструкторы. Множество контактов между отдельными опилками не обеспечивали стабильной работы прибора – в результате остался один контакт. Перепробовали массу пар различных веществ в контакте, и лучшими оказались цинкит – халькопирит и гален – сталь. Кристаллы для детекторов изготавливали в кустарных условиях, получая тем не менее неплохие результаты. А сколько времени уходило на подбор «чувствительной точки»! Кристаллический детектор снабжался специальными ручкой или винтом, чтобы подбирать положение острия пружинки на поверхности кристалла. Теперь-то мы хорошо знаем, что кристаллический детектор – это обычный полупроводниковый диод, который можно купить в любом магазине радиотоваров!

С изобретением кристаллического детектора появился детекторный радиоприемник – устройство предельно простое и эффективное. Детекторный приемник просуществовал без заметных изменений более полувека.

Вот схема детекторного приемника. Вы можете собрать его менее чем за час и послушать передачи местных радиовещательных станций. Для этого понадобятся достаточно длинная (20...30 м) наружная антенна и заземление (в городе можно подключить провод заземления к водопроводным трубам или арматуре железобетонного здания). Детекторный приемник не обладает усилением, и громкость звука в телефонах определяется только мощностью принятого сигнала. Давайте разберемся в назначении отдельных элементов, обозначенных на схеме приемника. С антенной все ясно – на ее проводе наводится радиоволной напряжение принимаемого сигнала. Оно тем больше, чем длиннее антенна. Но это верно только до тех пор, пока длина антенны менее четверти длины волны принимаемой станции. Более длинные антенны делать уже нецелесо-

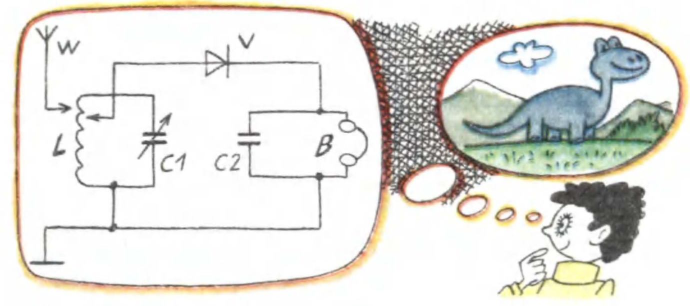
образно. Заземление заменяет «вторую половинку» диполя антенны. Можно использовать противовес – еще одну антенну примерно такой же длины, но расположенную поближе к земле. Сделать заземление обычно проще.

Далее мы видим уже знакомый нам колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсатора переменной емкости $C1$. Контур резонирует на собственной частоте, которая должна совпадать с частотой принимаемой радиостанции. Изменяя емкость конденсатора, можно изменять частоту настройки. Обратите внимание, что антенна подключена к части витков катушки с помощью регулируемого отвода (обозначен стрелкой). Сделано это не зря. Антенна обладает некоторым собственным сопротивлением, которое имеет и активную, и реактивную компоненты. Лишь при длине антенны, точно равной четверти длины волны, ее сопротивление составляет 73/2 = 36,5 Ом и является чисто активным. У более коротких антенн активное сопротивление меньше, и к нему добавляется еще реактивное (в данном случае – емкостное) сопротивление. Реактивное сопротивление антенны несколько расстраивает по частоте контур приемника, что можно скомпенсировать соответствующим изменением емкости $C1$. А для того чтобы в контур, а затем и в детектор из антенны поступала максимальная мощность сигнала, сопротивления контура и антенны необходимо согласовать, т.е. уравнять по абсолютной величине. Условия согласования имеют вид

$$R_A = R_K; \quad X_A = -X_K.$$

Это означает, что активные сопротивления должны быть равны, а реактивные равны по величине, но противоположны по знаку. Переключая антенну по отводам катушки, мы изменяем ее коэффициент включения k и приведенное к зажимам контура сопротивление, равное R_A/k^2. Например, подключив антенну к половине витков катушки, мы увеличим ее приведенное сопротивление в четыре раза.

Аналогично контур связан и с детектором. Перемещая отвод детектора кверху, мы отбираем из контура бóльшую мощность, но при этом сильнее нагружаем его. И селективность контура уменьшается. Именно поэтому при полном включении детектора мы можем услышать две станции сразу. Ослабляя связь с контуром и антенны, и детектора, можно значительно увеличивать подавление сигналов мешающих станций за счет возросшей добротности контура. Но громкость приема несколько понизится из-за потерь энергии сигнала в контуре.



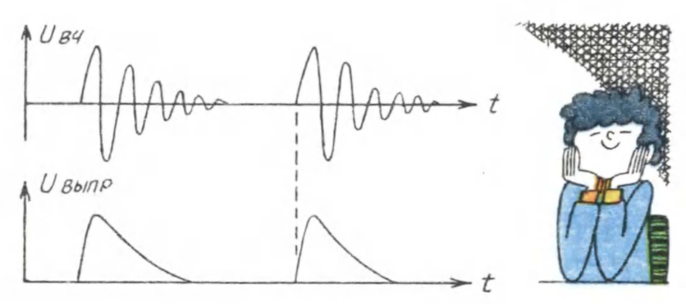
Принципиальная схема детекторного приемника

И наконец, последние две детали детекторного радиоприемника. Это - телефоны (наушники), которые должны быть чувствительными и высокоомными, т.е. иметь собственное сопротивление не менее нескольких тысяч ом (килоом), и блокировочный конденсатор *C2*. Он имеет малое сопротивление для токов высокой частоты и позволяет этим токам поступать непосредственно к детектору. В то же время его сопротивление для токов звуковой частоты велико, и эти токи проходят через катушки телефонов. Приемник будет работать и без блокировочного конденсатора, но заметно тише.

Ну вот, мы и познакомились со схемой вечно молодого дедушки радиоприемной техники - детекторного радиоприемника. О конструкциях говорить не будем - их предложено столько, что можно из их описаний составить целую книгу.

Между прочим, мы убедились, что детекторный приемник не так уж прост, как это могло показаться сначала. В нем, например, для получения громкого приема должны выполняться условия согласования антенны с контуром, а контура с детектором, к которому подключены наушники. На практике оптимального согласования добиваются по максимальной громкости приема.

Но вернемся к истории. Что же могли слышать первые радисты, настроив детекторный приемник на частоту искрового передатчика? Вот осциллограмма его колебаний (осциллограмма - слово современное, а в описываемое время и осциллографов-то еще не было!). Если всплески колебаний, соответствующие искровым разрядам, происходят со звуковой частотой, то после выпрямления колебаний детектором получается импульсный звуковой сигнал. Если же передатчик дуговой, то при настройке на его частоту слышны сильный шум или шипение. Вот и все. Но уже в то время начали задумываться о передаче по радио речевых звуковых сигналов. Ведь это уже делалось по проводам. Телефоны А. Белла и Т. Эдисона успешно функционировали во многих городах мира. Как перенести звуковой сигнал на высокую радиочастоту? Вы уже знаете, как это делается: путем амплитудной модуляции. Но прежде надо получить несущее радиочастотное колебание! Это стало возможным с изобретением радиоламп. Экспериментальный вакуумный диод изготовил еще Эдисон - он ввел в изобретенную им же лампочку накаливания второй электрод - анод. Но практического применения диоду Эдисон не нашел. Это сделал в 1904 году другой изобретатель - Дж. Флеминг. Вакуумные диоды могли использоваться для детектирования высокочастотных колебаний наряду с кристаллическими. В 1907 году Ли де Форест ввел в вакуумный диод третий электрод - сетку. Теперь

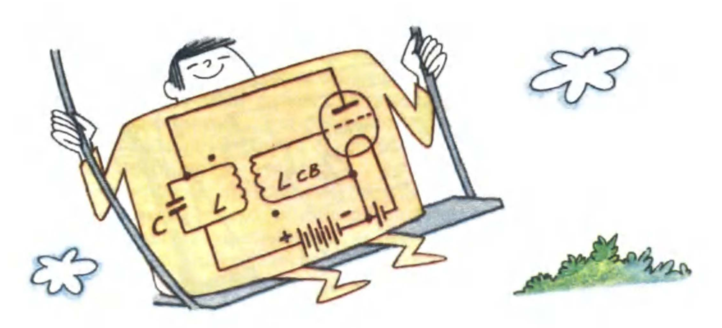


Прием сигналов искрового передатчика

радиоинженеры получили новый эффективный прибор для усиления колебаний – радиолампу. Ну а где усиление, там и генерация. Любой начинающий радиолюбитель вам подтвердит: часто делаешь усилитель, а получается генератор! Виноваты вредные (как говорят, паразитные) наводки сигнала с выхода усилителя на его вход. Генератор, вырабатывающий колебания самостоятельно, называют автогенератором. Любой, даже самый сверхсовременный автогенератор содержит два основных элемента, соединенные в кольцо: усилитель и колебательную систему. Первым служит радиолампа или транзистор, вторым – колебательный контур или кварцевый кристалл. В колебательной системе всегда существуют потери энергии. Если их не восполнять, колебания будут затухающими, как в искровом передатчике. Но часть энергии колебаний усиливается и снова поступает в колебательную систему через цепь положительной обратной связи, восполняя потери. Когда неопытный радиолюбитель делал усилитель, обратная связь могла возникнуть через емкость между входными и выходными проводниками, через общий провод питания или еще каким-либо образом. В результате усилитель превращался в генератор, и окружающим приходилось затыкать уши, чтобы не оглохнуть от громкого свиста, издаваемого неудачной конструкцией!

Давайте рассмотрим схему генератора на вакуумном триоде, сконструированного В. Мейснером в 1913 году. Долгие годы этот вариант так и называли – схема Мейснера. Колебательный контур включен в анодную цепь лампы, и через катушку контура протекает анодный ток. С контурной катушкой индуктивно связана еще одна катушка связи $L_{св}$. На ее выводах возникает точно такое же напряжение колебаний, как и в контуре, лишь несколько меньшее по амплитуде. Оно приложено к сетке лампы и управляет анодным током. Усиленные колебания вновь поступают в контур и поддерживают в нем автоколебательный процесс.

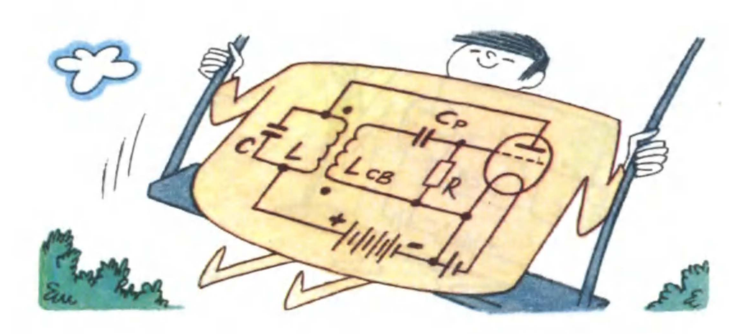
Для правильной работы генератора необходимо выполнение двух условий: баланса фаз и баланса амплитуд. Условие баланса фаз состоит в том, чтобы колебания из анодной цепи лампы поступали в такт с колебаниями контура. В противном случае произойдет не возбуждение, а подавление колебаний. Разумеется, вам приходилось качаться на качелях, если и не во взрослом возрасте, то хотя бы в детстве. Наверное, кто-нибудь раскачивал вас. Заметили, что он прикладывал усилие в такт с движением качелей. При этом амплитуда качаний увеличивалась. Для того чтобы остановить качели,



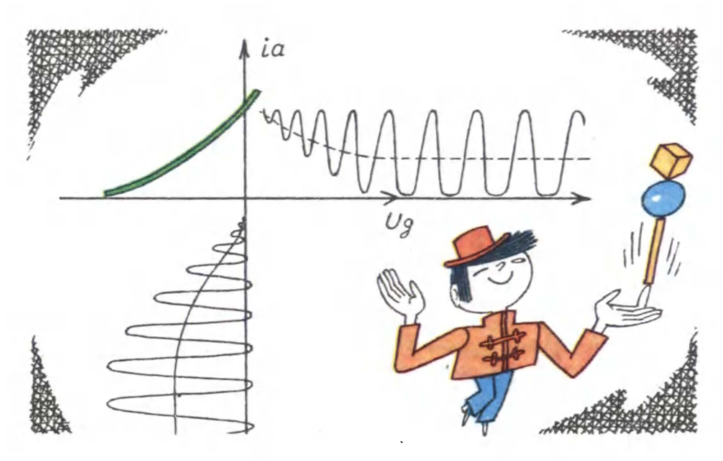
Генератор Мейснера на вакуумном триоде

достаточно приложить усилие в противофазе с движением качелей. Баланс фаз обеспечивается правильным включением выводов катушки обратной связи $L_{св}$. Начала обмоток обозначены на схеме генератора точками (предполагается, что обе катушки намотаны в одну сторону). Если, например, в какой-то момент на верхнем по схеме выводе контура оказывается положительная полуволна напряжения, то сетка триода получает отрицательный потенциал. Анодный ток уменьшается, а вместе с ним уменьшается и падение напряжения на контуре. Следовательно, потенциал анода возрастает, поддерживая положительную полуволну колебаний. Во время отрицательной полуволны колебаний в контуре анодный ток растет, а напряжение на аноде падает, также поддерживая эту полуволну.

Другое условие, которое должно выполняться в автогенераторе,- условие баланса амплитуд. Оно требует, чтобы амплитуда колебаний, поступающих от лампы в контур, была достаточной для покрытия собственных потерь в контуре. Если лампа будет «раскачивать» контур сильнее, амплитуда колебаний в нем будет нарастать, а если слабее - то уменьшаться. При выполнении условия баланса амплитуд произведение коэффициентов усиления лампы и коэффициента передачи цепи обратной связи должно равняться единице. На практике, чтобы обеспечить быстрое нарастание амплитуды колебаний сразу после включения генератора, это произведение выбирают несколько больше единицы путем подбора связи между катушками. Тогда по мере нарастания амплитуды колебаний усиление лампы уменьшается и амплитуда колебаний, достигнув определенной величины, остается далее неизменной. В описываемом генераторе это происходит за счет ограничения амплитуды колебаний, усиливаемых лампой,- ведь анодный ток может уменьшаться только до нуля и возрастать только до определенной величины, задаваемой конструкцией лампы. Значительно лучше работают генераторы со специальными цепями стабилизации амплитуды. Простейшим и очень распространенным вариантом является цепь автоматического смещения сетки или, как ее называли раньше, по-старинке, гридлик (от англ. grid - сетка, leak - утечка). На рисунке показана схема генератора с автоматическим смещением. Добавились элементы $C_р$ - разделительный конденсатор и R - резистор утечки сетки. Во время положительных полуволн радиочастотного напряжения на сетке часть электронов оседает на нее, создавая сеточный ток. В предыдущей схеме генератора сеточный ток лишь вносил потери в колебательный контур. Здесь сеточный ток выпол-



Автогенератор со стабилизацией амплитуды

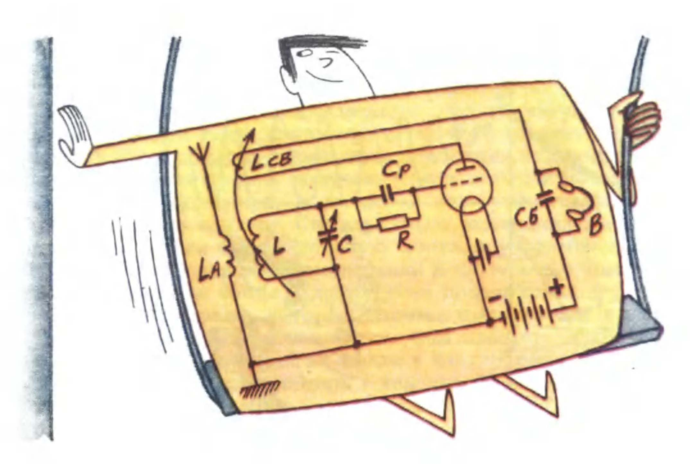


Процесс «мягкого» возбуждения колебаний в автогенераторе

няет полезную роль – проходя по резистору утечки сетки, он заряжает конденсатор C_p так, что на сетке образуется отрицательный потенциал. Он тем больше, чем больше амплитуда колебаний. По мере возрастания амплитуды колебаний возрастает и отрицательное напряжение смещения на сетке, запирающее лампу. Усиление ее уменьшается, и амплитуда колебаний стабилизируется. Описанный генератор обеспечивает «мягкое» возбуждение колебаний. Раздвинем контурную катушку и катушку обратной связи настолько, что колебания прекратятся (уменьшится коэффициент обратной связи). Сблизив катушки, мы получим возбуждение колебаний сначала очень малой амплитуды, затем большей. Раздвинув катушки снова, получим плавное уменьшение амплитуды колебаний до нуля. Никаких резких скачков амплитуды колебаний в нашем генераторе не наблюдается.

Мы так подробно остановились на схеме генератора Мейснера потому, что он начал новую эпоху в радиотехнике. Радисты получили наконец, средство для генерирования незатухающих колебаний. Осталось связать с колебательным контуром антенну, а в цепь анодной батареи включить телеграфный ключ – и передатчик готов! Нужна большая мощность? Делайте большую лампу! Так и поступили. Инженеры моментально включились в соревнование по изготовлению все более мощных ламп (50, 100, 200 Вт) и вскоре перешагнули и киловаттный рубеж. Оставалась неусовершенствованной техника радиоприема. Тут реванш взяли англичане. В том же 1913 году Роунд, экспериментируя с генератором Мейснера, открыл возможность автодинного приема.

Что такое автодинный прием? Это прием с использованием собственного генератора незатухающих колебаний, причем все процессы приема происходят в одном активном элементе – триоде. Посмотрите на схему простейшего автодинного приемника. Она мало отличается от схемы генератора. Добавлены лишь цепь связи с антенной да телефонные трубки в анодной цепи лампы, зашунтированные блокировочным конденсатором (назначение его нам уже известно – замыкать токи высокой частоты). Контур теперь включен



Приемник, который в зависимости от коэффициента обратной связи может быть и автодинным, и регенеративным

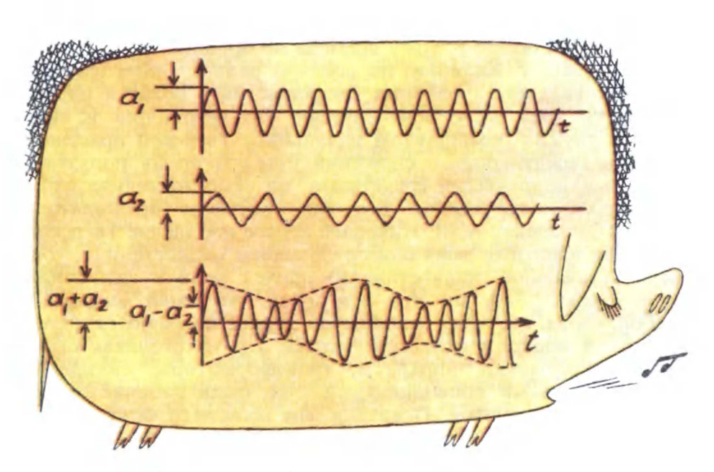
не в анодную, а в сеточную цепь. Это удобнее, поскольку крупногабаритный переменный конденсатор с ручкой настройки уже не находится под высоким потенциалом анодной батареи, а катушка обратной связи включена в анодную цепь лампы. Связь ее с контурной катушкой сделана регулируемой, что обозначено на схеме изогнутой стрелкой.

Какие же процессы происходят в автодинном приемнике? Прежде всего надо отметить, что с помощью ручек настройки частота собственных колебаний устанавливается очень близкой к частоте принимаемого сигнала. Разность частот может составлять 400... ...1000 Гц. Следовательно, принимаемый сигнал попадает в полосу пропускания колебательного контура. Приведем простой пример: пусть приемник настроен на частоту 300 кГц, а добротность контура составляет 100. Тогда полоса его пропускания (ширина резонансной кривой) составляет 300 кГц/100 = 3 кГц или ± 1,5 кГц от частоты настройки. Итак, в контуре существуют сразу два колебания: собственное, с большой амплитудой, и принимаемое – с малой. Сумма двух синусоидальных колебаний с несколько отличающимися частотами и существенно различными амплитудами представляет собой один сигнал с изменяющейся амплитудой – сигнал биений. В этом легко убедиться, графически сложив исходные два колебания. Если в начале графика колебания были в фазе и суммарное колебание имеет амплитуду, равную сумме амплитуд $a_1 + a_2$, то спустя полпериода разностной частоты исходные колебания станут противофазными и суммарное колебание будет иметь амплитуду $a_1 - a_2$. Таким образом, амплитуда суммарного колебания изменяется с частотой расстройки между собственными и принимаемыми колебаниями, т. е. с частотой биений. Ну а если амплитуда колебаний изменяется, то благодаря действию гридлика изменяется и смещение на сетке лампы. Эти изменения усиливаются лампой, и в телефонах будет слышен звуковой тон биений. Уверен, что подобные биения вы не раз слышали, вращая ручку настройки приемника. Они проявляются в виде свиста, тон которого изменяется от высокого до

низкого, а при дальнейшем вращении ручки настройки, напротив, от низкого до высокого. Правда, в современных радиовещательных приемниках свист – вредный эффект, обусловленный несовершенством самого приемника.

Итак, автодин позволил принимать незатухающие колебания «на биениях» с помощью телефонных трубок. Чувствительность приема, а следовательно, и дальность связи резко возросли. Но мы пока ничего не сказали о радиовещании, а ведь в этой главе предполагалось рассказать именно о нем!

У нас есть генератор незатухающих колебаний и два вида приемников – детекторный и ламповый. Чтобы передать речевой или музыкальный сигнал, инженеры пошли самым очевидным путем – стали изменять амплитуду излучаемых колебаний в такт со звуковым напряжением. В передатчике для этого служила еще одна лампа – модуляторная. В простейшем случае она включалась последовательно с генераторной и регулировала ее анодный ток в такт со звуковыми колебаниями. Ну а чем больше ток генераторной лампы, тем больше и амплитуда колебаний. На детекторный приемник АМ сигнал принимался просто – в телефонах прослушивался звук. Сложнее обстояло дело с автодинным приемником. Он был почти идеален по тем временам для приема телеграфных сигналов. Любопытно отметить, что уже в 50-х годах известный советский коротковолновик А. В. Прозоровский предложил схему автодинного приемника для радиолюбителей: он обеспечивал чувствительность в единицы микровольт, позволял принимать сигналы многих удаленных станций! А вот принимать АМ станции мешал свист – биения между несущей сигнала и собственными колебаниями. Наметились два пути решения проблемы. Один путь – настроить автодин точно на несущую сигнала. Тогда тон биений понижается до нуля, а собственные колебания «захватываются» несущей сигнала до совпадения с ней по фазе. Поскольку здесь осуществляется синхронизация собственных колебаний принимаемыми, приемник назвали синхродином. Работал синхродин довольно неустойчиво, поскольку малейшие изменения питающих напряжений или температуры окружающей



Биения двух синусоидальных колебаний

среды приводили к «уходу» частоты колебаний и появлялся свист – биения. Особенно трудно было принимать слабые сигналы. Решение проблемы нашел американец Э. Армстронг. В 1922 году Армстронг предложил регенеративный приемник для АМ сигналов. Схема его практически не отличается от схемы автодина Роунда, но регулировка совсем другая. Перемещая катушку обратной связи, регенератор подводят к самому порогу возникновения колебаний, когда собственных колебаний еще нет, но они вот-вот могут возникнуть. В этих условиях бо́льшая часть потерь в колебательном контуре компенсирована (регенерирована) цепью обратной связи, и его эффективная добротность может достигать нескольких тысяч. В результате существенно возрастает селективность приемника. А поскольку пик резонансной кривой высокодобротного контура становится выше, возрастает и чувствительность. Биений нет, поскольку в контуре имеются только колебания принимаемого сигнала. Они детектируются в сеточной цепи и, будучи усиленными лампой, воспроизводятся в телефонах. В 20-е и 30-е годы очень большое распространение получил двухламповых приемник, в котором одна лампа служила регенеративным сеточным детектором, а другая – усилителем звуковой частоты. Вот мы и познакомились с техникой, от которой началось радиовещание. А теперь расскажем о том, как оно развивалось в нашей стране.

У истоков советского радиовещания

Хотя первые опыты по радиосвязи и проводились в России, отсталая самодержавная страна не могла обеспечить быстрых темпов развития радиотехники. Наступил 1917 год. Молодая Советская Республика, окруженная кольцом фронтов гражданской войны, полностью изолирована от внешнего мира. Положение с телеграфной проволочной связью отчаянное – линии порваны, столбы повалены, проволоки нет. О систематическом ремонте проводных линий и говорить нечего. А связь была очень нужна, просто необходима. Естественно, возникла мысль о радио. И 21 июля 1918 года В. И. Лениным был подписан декрет о централизации радиотехнического дела в России. К тому времени неожиданно выяснилось, что в Твери (ныне г. Калинин) на военной радиостанции имеется группа высококвалифицированных специалистов в области радио. Душой группы был М. А. Бонч-Бруевич. До революции в чине поручика он служил помощником начальника Тверской приемной радиостанции международных сношений. Еще в то время, пользуясь примитивными подручными средствами, он самостоятельно изготавливал электронные лампы. Вот как описывает председатель Радиосовета большевик А. М. Николаев первое посещение Тверской радиостанции: «Знакомя меня с оборудованием радиостанции, тов. Лещинский (начальник радиостанции) провел меня в следующее отделение барака... «А вот это – для души; это наша маленькая радиолаборатория, где мои товарищи по службе занимаются исследованиями». Я вошел в отделение барака, где на столиках были расставлены приемники, аппараты, трансформаторы, связанные между собой тонкими проводничками. Это были рабочие схемы разных опытных установок. Показали мне несколько фокусов, которые радисты обычно показывают дилетантам, – «соловья в приемнике», самозажигающуюся лампу и пр. При осмотре радиолаборатории я обратил внимание на лампочку необычного фасона. Во

Франции, где я работал в радиолаборатории одной французской компании, мне приходилось иметь дело с радиолампами, да и в России я видел на наших станциях французские радиолампы, завезенные из Франции во время войны. Показанная мне лампа представляла собой что-то новое. Оказалось, что инженер М. А. Бонч-Бруевич разрабатывал свой тип катодной лампы, которая дает те же результаты, что и французская, но может быть изготовлена из отечественных материалов. Лампа была изготовлена целиком здесь, в лаборатории. Да ведь это же клад! Запасы французских ламп приходили к концу; оцепленные кольцом блокады, мы ниоткуда не могли получить этих ламп, а без них никакая работа по приему заграничных станций немыслима. Но и, кроме того, работа над катодной лампой была всеобщим увлечением специалистов за границей. Покойный Феррье (крупный французский ученый в области радио) говорил мне еще в 1914 году, что катодная лампа имеет большое будущее как генератор. Вспомнились мне эти слова. А тут, в глуши, в бараке, где зимой насквозь свистит ветер, при наличии самого примитивного оборудования создана эта самая катодная лампа, которой принадлежит будущее. Творцы этой лампы-генератора, превратившейся впоследствии в радиотелефон, увлеченные идеей создания своих радиоаппаратов, презирая лишения, голод и холод, самоотверженно трудились над великим делом».

При содействии В. И. Ленина организуется Нижегородская радиолаборатория – первый научно-исследовательский институт Советской Республики. Переехавших в Нижний Новгород сотрудников Тверской радиостанции обеспечили квартирами, одеждой и пайком. В. И. Ленин лично заботился о нуждах радиолаборатории, всячески подчеркивая спешность и важность ее работ. Весь 1919-й год был годом бурного роста и укрепления радиолаборатории. Она сгруппировала вокруг себя лучшие силы ученых, работающих в области радио. Первоочередными задачами считались организация производства радиоламп; научные изыскания в области радиотелеграфа, радиотелефона и смежных наук; разработка типовой приемной радиостанции; разработка передатчиков дальнего действия.

К 1920 году М. А. Бонч-Бруевич провел успешный эксперимент с первым радиотелефонным передатчиком. Вот как описывает это А. М. Николаев: «Первые опыты с радиотелефоном, сконструированным Бонч-Бруевичем, дали благоприятные результаты. Опытная передача, производимая прямо из здания лаборатории, была прямо триумфом радиолаборатории. Из многих мест сыпались телеграммы: «Слышали человеческий голос по радио, объясните!».

Со станций, с которыми было предварительно договорено об опытах, получались депеши: «Слышим хорошо – повторяйте!». Район действия все увеличивался. Стали получать письма, в которых сообщалось немало курьезов, вроде того, что с одним радистом случилось нервное потрясение, когда вдруг вместо обычных телеграфных сигналов Морзе он услышал сильный голос: «Алло, алло! Говорит Нижегородская радиолаборатория, слушайте!».

В. И. Ленин сразу оценил всю важность и перспективность радиотелефонии в деле пропаганды и агитации. Широко известно его письмо М. А. Бонч-Бруевичу: «Пользуюсь случаем, чтобы выразить Вам глубокую благодарность и сочувствие по поводу большой работы радиоизобретений, которую Вы делаете. Газета без бумаги и «без расстояний», которую Вы создаете, будет великим делом. Всяческое и всемерное содействие обещаю Вам оказывать этой и подобным работам.

С лучшими пожеланиями. В. Ульянов (Ленин)».

17 марта 1920 года было принято постановление:

«1. Поручить Нижегородской радиолаборатории Наркомпочтеля изготовить в самом срочном порядке не позднее двух с половиной месяцев Центральную радиотелефонную станцию с радиусом действия 2000 верст[1].

2. Местом установки назначить Москву и к подготовительным работам приступить немедленно...».

Так была открыта зеленая улица строительству радиотелефонных вещательных станций. Первая радиотелефонная станция на Ходынке в Москве вскоре вышла в эфир. Вслед за ней строились и другие. Спустя несколько лет была введена в действие и самая мощная в мире длинноволновая радиостанция им. Коминтерна.

В 1921–1922 годах на бывшей Вознесенской улице Москвы поднялись невиданные москвичам сооружения – две 150-метровые мачты. Это были антенны Центральной радиотелефонной станции имени Коминтерна (ЦРТС). А 7 ноября 1922 года она уже транслировала праздничный концерт. Станцию хорошо принимали не только на территории Советского Союза, но и в других странах. Несколько лет спустя ввели в строй новый передатчик мощностью 500 кВт. Сейчас здание радиостанции снесено, но имя, данное улице в день рождения ЦРТС, сохранилось – бывшая Вознесенская теперь называется улицей Радио. Непрерывно расширялась и сеть радиоприемников. Детекторные приемники мастерили сами радиолюбители. Разработали и ламповый приемник с «рупором», т. е. громкоговорителем, позволяющим прослушивать передачи многочисленной аудиторией. Множество энтузиастов занялось радиофикацией деревень и сел. Неграмотные крестьяне слушали голос Москвы. Мечта Ленина о митинге с миллионной аудиторией становилась явью. Разумеется, для крестьян, не умевших ни читать, ни писать, «говорящий ящик» был чудом. Его работа явилась лучшей пропагандой могущества науки и техники. Сколько людей заглядывало за круг картонного диффузора, приоткрывало крышку ящика приемника, пытаясь найти спрятанного диктора! Сельским радиофикаторам хватало работы и по распространению элементарных технических знаний среди слушателей.

Совершенствование техники передачи и приема радиовещательных программ

Все приходилось начинать с нуля. Массу проблем решали радиоспециалисты. Как передать в эфир концерт? Как разместить исполнителей, микрофоны? Как оборудовать радиовещательную студию? Большую помощь оказала в этих вопросах уже достаточно развитая техника граммофонной записи. А с каким восторгом принимались радиослушателями первые концертные программы, передачи голосов известных певцов и музыкантов! Непрерывно возрастало качество радиопередач, расширялся частотный диапазон, уменьшались искажения.

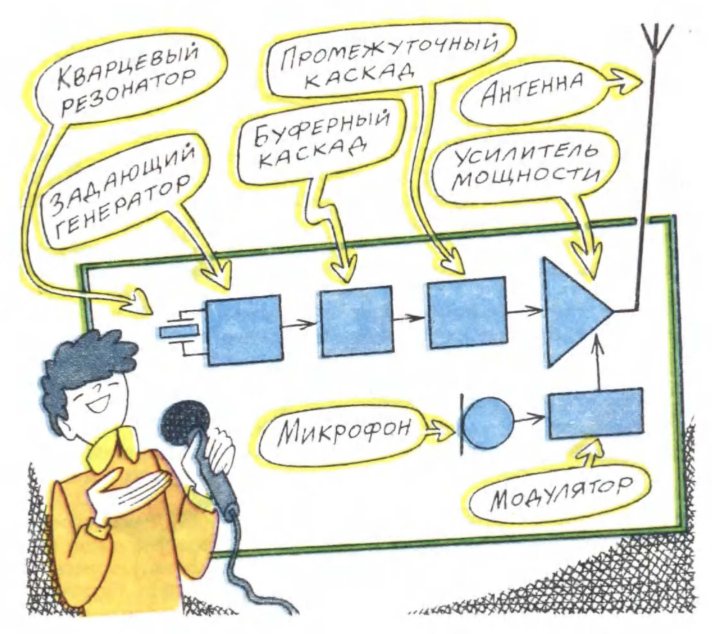
Простейший передатчик, в котором контур автогенератора был связан с антенной, уже не устраивал радиоспециалистов. Мощность можно было увеличить, применив более мощные лампы. Но стоило подуть ветру, раскачать провода антенны, и ее параметры, в част-

[1] *Верста* – старая русская мера длины, равная 1,0668 км.

ности реактивное сопротивление, изменялись. Изменялась и частота настройки контура, а значит, и частота излучаемого сигнала. Это недопустимо. Большая мощность излучения приводила к нагреву деталей контура, из-за их теплового расширения опять «дрейфовала» частота. От мощных автогенераторов пришлось отказаться.

Теперь радиопередатчики делают по-другому. Маломощный задающий генератор тщательно экранирован и в ряде случаев термостатирован. Его слабый сигнал усиливается промежуточными каскадами, их часто называют буферными. Буферные каскады полностью исключают влияние нагрузки (антенны) на работу задающего генератора. Наконец, мощный каскад – усилитель с внешним возбуждением от промежуточных каскадов. Там применяются специальные, очень мощные лампы с воздушным или водяным охлаждением анода. Выходной контур занимает целую комнату – большая катушка, свернутая из медной трубы, конденсатор с большими зазорами между пластинами. Ведь анодное напряжение исчисляется десятками киловольт. Отдельные комнаты занимают модулятор – мощный усилитель звуковых частот – и выпрямители сетевого напряжения, служащие для питания всей радиостанции. Такая структурная схема радиопередатчика используется и по сей день.

Прогресс радиоэлектроники изменил лишь «начинку» квадратиков, показанных на схеме. Задающий генератор, часть промежуточных каскадов и микрофонный усилитель выполняются теперь на транзисторах и микросхемах. Все чаще задающим генератором служит синтезатор частоты. Что это такое? Замечательное устройство! Основу его составляет высокостабильный кварцевый генератор или даже атомный стандарт частоты. Его сигнал делится и ум-

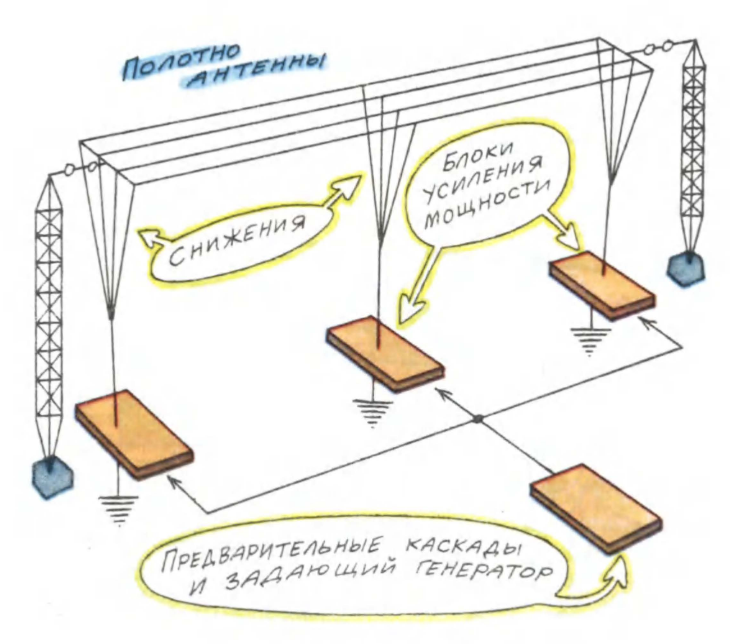


Структурная схема радиовещательного передатчика

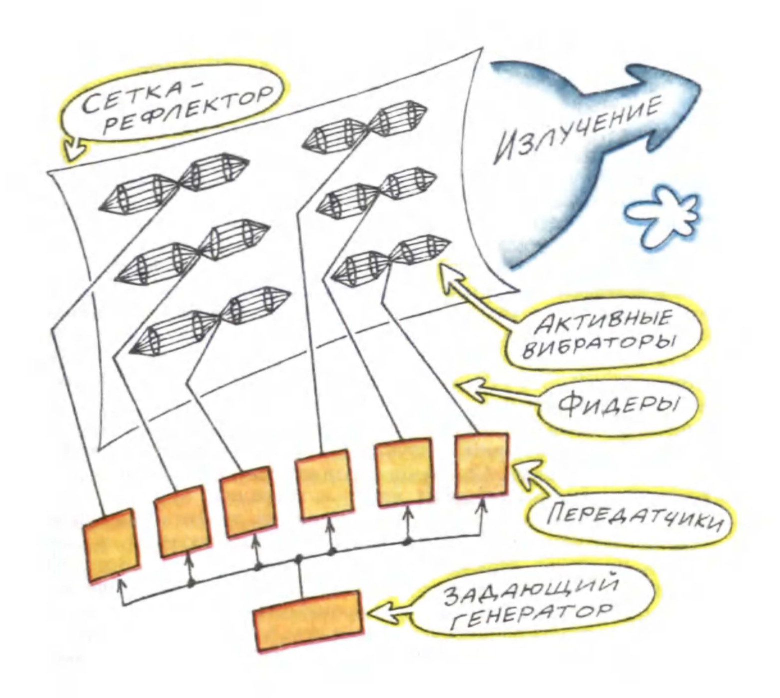
ножается по частоте на произвольное число, которое можно устанавливать, например, с помощью декадных переключателей. В результате из одной фиксированной стабильной частоты можно получить целую сетку частот с шагом, скажем, 1 кГц или 10 Гц. На одной из частот сетки и работает радиовещательная станция.

Когда мощность радиостанций достигла сотен киловатт (например, радиостанция им. Коминтерна имела мощность 500 кВт), оказалось нецелесообразным получать всю эту мощность от одного каскада. Делают несколько оконечных блоков, каждый, скажем, по 100 кВт. Все блоки возбуждаются в одной и той же фазе от одного задающего генератора. Выходные сигналы блоков складываются в одной общей нагрузке – антенне. При этом в точке питания антенны концентрируется очень большая мощность. Чтобы избежать перенапряжений и сверхтоков, используют проволочные антенны с несколькими снижениями. Каждый мощный блок питает антенну через собственное снижение. Такая конструкция антенны характерна для диапазона длинных волн. Антенны – мачты диапазонов длинных и средних волн часто имеют гигантские размеры, достигая в высоту многих десятков метров.

В диапазоне коротких волн советскими специалистами предложен более радикальный способ увеличения излучаемой мощности. Это способ сложения мощностей непосредственно в эфире. Представьте себе несколько передатчиков, каждый со своей антенной, расположенные рядом. Все они возбуждаются одним и тем же задающим генератором и модулируются одной и той же звуковой программой. Фазы возбуждения передатчиков подбирают так, чтобы в желаемом направлении их колебания, излученные антеннами,



Принцип построения мощных длинноволновых передатчиков



Сложение излучаемых мощностей в эфире

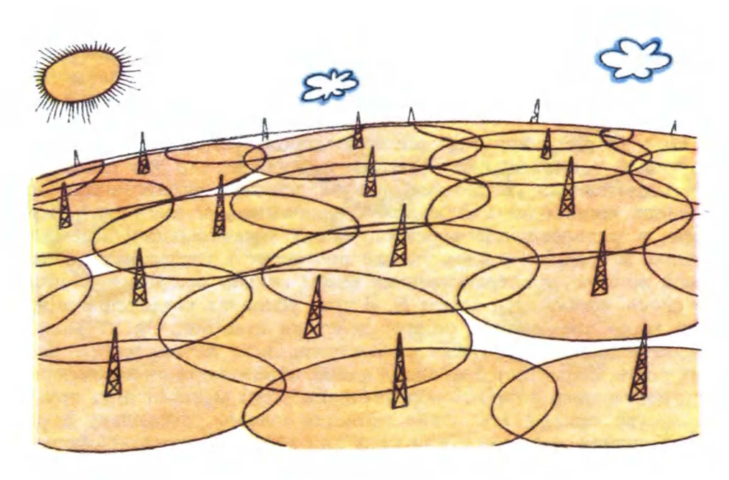
складывались. Способ сложения мощностей в эфире не только позволяет избавиться от перенапряжений в антеннах, но и существенно увеличивает направленность излучения. Например, если вещание ведется на Дальний Восток, антенны регулируют так, чтобы получать узконаправленный луч только в ту сторону, на восток, и никуда больше. К сожалению, этот способ неприменим в диапазонах длинных и средних волн, где используются ненаправленные антенны.

Но и в этих диапазонах все шире используется так называемое синхронное радиовещание. Поясним подробнее, что это такое. На заре радиотехники увеличение радиуса действия радиостанции достигалось лишь одним способом – увеличением ее мощности. Как видим, и радиовещание пережило эпоху гигантомании! Днем на длинных и средних волнах сигнал поступает к приемнику только земной волной – пространственная волна сильно поглощается нижним слоем ионосферы, слоем D. В этих условиях увеличение мощности мало увеличивает радиус действия станции. Он не может превзойти одной-двух тысяч километров. Зато ночью радиус действия резко возрастает благодаря волне, отраженной от ионосферы, и множество сверхмощных передатчиков очень мешают друг другу. А качество приема все равно остается низким, поскольку отраженный сигнал сильно искажается за счет изменчивости ионосферы и интерференции лучей, приходящих к приемнику разными путями. В этих условиях для обеспечения радиовещанием страны или региона

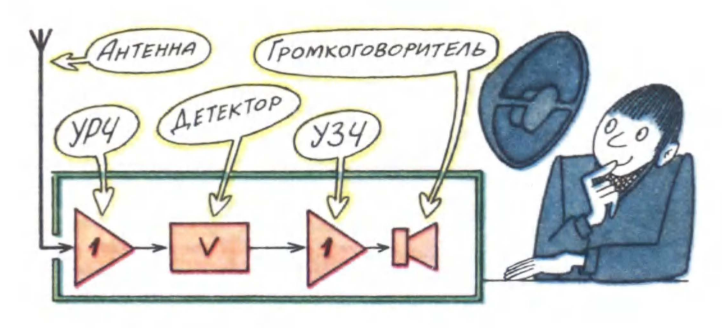
6–647

выгоднее построить не одну сверхмощную, а сеть маломощных станций, равномерно размещенных на территории. Тогда в любой пункт приходит поверхностная волна от ближайшей станции. Но как быть, если в данный пункт приходят волны от двух или трех станций? Ничего страшного не случится, если все станции будут передавать одну и ту же программу, а их несущие сигналы будут синхронизированы друг с другом с высокой точностью. На всей территории образуется единое поле волн одинаковой частоты и никаких взаимных помех нет. Для синхронизации сети станций используют сигналы эталонных частот, получаемых от высокостабильных атомных стандартов и излучаемых в эфир специальными радиостанциями. Как мы уже знаем, на европейской территории СССР круглосуточно принимается эталонный сигнал с частотой 66,(6) кГц, излучаемый передатчиком около Москвы, на азиатской территории СССР – 500 кГц, передаваемый из Иркутска. Аналогичные системы имеются и в других странах. На каждой из станций синхронной сети эталонный сигнал принимается, преобразуется по частоте синтезатором и вновь излучается в эфир как несущая уже на рабочей частоте станции. Синхронное радиовещание позволило резко повысить качество приема на длинных и средних волнах.

Посмотрим теперь, как совершенствовалась техника радиоприема. Радиовещательный приемник должен быть массовым, а следовательно, простым, дешевым и легким в производстве. Вот чем объясняются долгая популярность и широкое распространение детекторных приемников. Но желание принимать и дальние станции всегда жило в каждом радиослушателе, а тем более радиолюбителе. В 20 – 30-е годы был очень популярен одноконтурный двухламповый приемник с регенеративным детектором. Он давал неплохие результаты при относительной простоте конструкции. Дальнейшее совершенствование приемников происходило двумя путями. В приемнике прямого усиления устанавливали несколько радиоламп. Одна, максимум две усиливали высокую (радио) частоту. Затем устанавливали детектор и несколько ламп для усиления низкой (звуковой) частоты. Была предложена и специальная система обозначения таких прием-



Сеть синхронного радиовещания



Приемник прямого усилителя 1-V-1

ников из букв и цифр. Первая цифра означала число каскадов усиления радиочастоты. Вторая буква – тип детектора: V – ламповый, К – кристаллический (полупроводниковый). Третья цифра – число каскадов усиления звуковой частоты. Например, 1-V-2 был достаточно сложным приемником с одним каскадом усилителя радиочастоты (УРЧ) (привыкайте к сокращениям!), ламповым детектором и двумя каскадами усилителя звуковой частоты (УЗЧ). Детекторный приемник в этой системе обозначался как 0-К-0.

Сразу стали очевидны и недостатки приемника прямого усиления. Чем больше каскадов УРЧ, тем, казалось бы, лучше приемник. Но перестраивать одновременно несколько контуров (ведь в каждом каскаде УРЧ минимум по одному контуру), сложно, а параметры контуров изменяются по диапазону, при этом меняется и усиление, и избирательность. Еще хуже обстоит дело в многодиапазонных приемниках, где надо переключать катушки нескольких контуров. Если в диапазонах длинных (ДВ) и средних волн (СВ) с недостатками приемника прямого усиления еще можно мириться, то для диапазона коротких волн построить хороший приемник прямого усиления практически невозможно.

В ламповых приемниках прямого усиления середины 30-х годов применялись радиолампы в больших стеклянных баллонах. Это уже не простейшие триоды. На триоде трудно сделать усилитель радиочастоты, поскольку паразитная обратная связь через емкость сетка – анод приводит к самовозбуждению. Появились экранированные лампы – тетроды с двумя сетками. Вторая сетка служила как бы экраном между управляющей сеткой и анодом; она так и называлась – экранирующей. А чтобы не мешать и даже способствовать движению электронов, на нее подавался положительный потенциал. Но электроны, ускоренные полем экранирующей сетки, бомбардировали анод, вызывая вторичную эмиссию электронов из анода, которым ничего не оставалось, как осесть на экранирующей сетке. Этот динатронный эффект устранили введением третьей сетки, антидинатронной (защитной), расположенной вблизи анода и имеющей редкие витки. Третья сетка соединялась с катодом. У лампы появился пятый электрод, и она стала называться пентодом. Пентоды имели отличные характеристики и широко использовались вплоть до недавнего времени.

Рядом с лампами установлены контурные катушки в больших цилиндрических алюминиевых экранах и блок конденсаторов переменной емкости, служащий для настройки приемника.



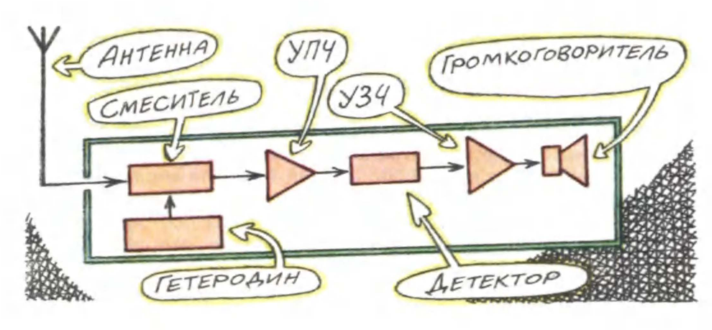
Тетрод и пентод

Другой путь усовершенствования приемников состоял в использовании супергетеродинной схемы, которую изобрел француз Л. Леви еще в 1917 году, а построил американец Э. Армстронг в 1919 году. Принцип супергетеродинного приема состоит в том, что принятые колебания преобразуются по частоте на фиксированную промежуточную частоту. На ней и происходит основное усиление сигнала. А поскольку промежуточная частота фиксирована, в усилителе промежуточной частоты (УПЧ) можно использовать много контуров, составляя из них полосовые фильтры, дающие необходимую избирательность. Уменьшается и опасность самовозбуждения, поскольку наводки от УПЧ на вход приемника уже не страшны, ведь он и входные цепи настроены на разные частоты.

Для преобразования частоты нужен специальный генератор – гетеродин. Его колебания смешиваются с колебаниями принимаемого сигнала в специальном элементе приемника – смесителе. Смеситель вместе с гетеродином образует преобразователь частоты. В наиболее простых и дешевых моделях приемников смеситель и гетеродин часто совмещают и выполняют на одном активном элементе – транзисторе.

В свое время для преобразователей частоты разработали даже специальные многосеточные лампы – пентагриды и гептоды. Две разные управляющие сетки в этих лампах служат для подачи на них напряжений сигнала и гетеродина.

Структурная схема супергетеродина показана на рисунке.



Супергетеродин

Входной сигнал от антенны поступает на преобразователь частоты, где, смешиваясь с сигналом гетеродина, образует промежуточную частоту (ПЧ). Для подавляющего большинства радиовещательных приемников она выбирается равной 465 кГц. Эта частота лежит как раз между диапазонами длинных и средних волн, на ней не работают радиовещательные станции. Например, мы настроили приемник на радиостанцию, работающую на частоте $f_c = 873$ кГц в диапазоне СВ. Гетеродин при этом возбуждается на частоте $f_г = 1338$ кГц, а в смесителе преобразование частот происходит по закону $f_г - f_c = f_{пч}$ (1338 − 873 = 465 кГц). Далее сигнал усиливается УПЧ на частоте 465 кГц и детектируется так же, как и в приемнике прямого усиления.

Несмотря на множество достоинств, супергетеродин имеет и недостатки. У него есть так называемый зеркальный канал приема. В рассмотренном нами примере промежуточную частоту 465 кГц можно получить и еще одним способом: $f'_c - f_г = f_{пч}$. Следовательно, мешающая станция, работающая на частоте 1803 кГц, дает ту же самую промежуточную частоту 465 кГц, и отделить ее в УПЧ не будет уже никакой возможности. Перед смесителем обязательно нужен преселектор – один или два колебательных контура, настроенных на частоту полезного сигнала и ослабляющих прием по зеркальному каналу. Одноконтурный преселектор дает в диапазоне коротких волн очень небольшое ослабление зеркального канала. В этом можно убедиться, внимательно прослушав диапазон КВ с помощью какого-либо не очень сложного радиовещательного приемника с широким обзорным КВ диапазоном. Одну и ту же станцию можно принять при двух положениях ручки настройки. В одном из них гетеродин настраивается на 465 кГц выше частоты сигнала, а в другом – на 465 кГц ниже. Сравнив громкость приема по основному и зеркальному каналам, удается оценить и избирательность входных цепей (преселектора). Описанный недостаток супергетеродина заставляет применять в профессиональных приемниках двух-трехконтурные входные цепи и очень часто – резонансный усилитель высокой частоты.

Другой недостаток супергетеродина, особенно заметный также у простых приемников,– это интерференционные свисты. Вы, наверное, слышали, как эстрадный артист изображает радиоприемник. Он свистит, воет, хрюкает и снова свистит! Свист в его интермедии преобладает, и это соответствует действительности. Откуда же берутся свисты в радиоприемниках?

Прежде всего давайте уясним себе, что любой свист возникает при биениях двух близких по частоте синусоидальных колебаний. Огибающая суммарного сигнала изменяется с разностной частотой (вспомните автодинный прием), и, если этот сигнал попадет на детектор, выделится сигнал звуковой частоты. Иногда даже и детектора не надо – любой усилитель имеет не совсем линейную характеристику и в какой-то мере обязательно детектируют сигнал. В приемнике прямого усиления свист возникает в единственном случае, когда из эфира приходят два близких по частоте сигнала. Случай достаточно редкий, поскольку все радиостанции работают строго на отведенных им частотах, а любые случаи «радиохулиганства» в эфире пресекаются соответствующими службами всех стран. В супергетеродинном приемнике есть собственный источник помех – гетеродин. Если его частота окажется близкой к частоте какой-либо мощной радиостанции, может появиться свист. Другой возможный случай: мы принимаем какую-либо радиостанцию по основному каналу приема, а на частоте зеркального канала работает



Интерференционные свисты в радиоприемнике

другая, мощная, сигнал которой хотя и слабо, но все же проникает через входные цепи. В результате образуется два сигнала промежуточной частоты – один полезный, другой – мешающий. Естественно, что между этими сигналами возникают биения – опять-таки интерференционный свист. Более того, преобразование частоты возможно не только на основной частоте, но и на гармониках гетеродина в соответствии с формулой $\pm f_с \pm mf_г = f_{пч}$, где m – любое целое число. Если сигналы помех на входе приемника достаточно сильны, то в преобразователе частоты могут возникать и гармоники частоты сигнала. Чтобы учесть и этот эффект, формулу для определения частот побочных каналов приема придется еще более усложнить: $\pm nf_с \pm mf_г = f_{пч}$, где n и m – любые целые числа. Что же делать, чтобы избежать подобных недостатков? Правильно проектировать приемник! Важен выбор режима преобразовательного каскада, обеспечивающий его линейность, важна высокая избирательность входного контура, важен рациональный монтаж приемника. Факторов очень много. Поэтому и качество работы двух приемников, собранных по похожим схемам, может оказаться совершенно разным. Вращаешь ручку настройки одного и часто слышишь свисты: «И...и...у...у, у...у...и...и». Вовсе не значит, что они приходят из эфира. Свисты возникают в самом приемнике! У одного эфир кажется забитым станциями, но это впечатление обманчиво, просто у этого приемника много побочных каналов приема. Обратите внимание: хотя станций и много, передачу большинства из них не то что слушать – разобрать трудно. Хороший приемник мало свистит, станции принимаются чисто, а между станциями есть «чистые» промежутки. Возьмите любой транзисторный приемник, послушайте его работу. Потом присоедините к нему большую внешнюю антенну и снова пройдитесь по диапазонам. Заметили, насколько возрос уровень помех? Благодаря возросшему уровню всех сигналов стали заметнее побочные каналы приема.

Вывод читателю, видимо, уже ясен. Не всегда важна высокая чувствительность, важнее качество работы приемника, его поме-

хоустойчивость. Увлекаться большими антеннами тоже чаще всего бесполезно – каждому приемнику лучше всего подходит своя антенна, а какой длины, на этот вопрос лучше всего ответить, подбирая длину антенны экспериментально.

Долгое время самым распространенным был пятиламповый супергетеродинный приемник, разработанный в конце 30-х годов. Основная его модификация содержала следующие каскады: преобразователь частоты с совмещенным гетеродином, выполненный на многосеточной лампе, усилитель ПЧ на пентоде, диодный детектор и двухламповый УЗЧ, причем первая лампа служила усилителем напряжения, а вторая – мощности.

С наступлением эры полупроводников ламповые приемники-мастодонты отошли в прошлое. Основным типом стал легкий портативный транзисторный приемник. Он содержит, как правило, преобразователь частоты с отдельным гетеродином, иногда один каскад усиления радиочастоты, два-три каскада усиления промежуточной частоты, детектор и два-три каскада усиления звуковой частоты. Число моделей транзисторных приемников огромно. Здесь и завоевавшие широкое признание «ВЭФ», «Спидола», «Океан», и более простые «Селга», «Альпинист», и многие-многие другие. Не будет ошибкой сказать, что портативный транзисторный радиоприемник стал нашим спутником в туристических походах.

Современное состояние радиовещания...

В мире огромное количество радиостанций. Как же они не мешают друг другу? Это вопрос вопросов, и решается он многие годы. Сейчас в диапазонах длинных и средних волн введена жесткая сетка для радиовещательных станций. Частотный интервал между несущими выбран равным 9 кГц в Европе и 10 кГц в Америке и Японии. Последние от нас настолько далеко, что слушать их передачи в упомянутых диапазонах нам практически невозможно. Поэтому остановимся подробнее на европейском распределении частот. Все частоты станций на средних волнах кратны частоте 9 кГц, т.е. являются ее гармониками. Убедитесь сами: радиостанции Всесоюзной программы «Маяк» работают на частоте 549 кГц – это 61-я гармоника частоты 9 кГц, другие московские станции – на частотах 846, 873 и 918 кГц – это 94, 97 и 102-я гармоники, Киев – 783 кГц – 87-я гармоника, Ленинград – 801 кГц – 89-я гармоника, Рига – 1350 кГц – 150-я гармоника. Ну и так далее. На длинных волнах сетка частот – $9m$, где m – целое число, введена пока только частично, и некоторые радиостанции излучают на частотах старой сетки, их можно найти по формуле $9m + 2$ кГц.

При принятом частотном распределении в диапазоне ДВ (150...408 кГц) получается 28 каналов, а в диапазоне СВ (525...1605 кГц) – 120 каналов. Но в европейском регионе радиостанций гораздо больше! Следовательно, на одной и той же частоте должны работать несколько станций. Это также учитывают при распределении частот. И совмещенные каналы отводят станциям, достаточно удаленным друг от друга территориально. В дневное время взаимных помех между ДВ и СВ станциями не возникает вообще, поскольку, как вы, вероятно, помните, пространственная волна поглощается слоем D ионосферы, а поверхностная волна распространяется лишь на ограниченное расстояние. Ну а ночью не

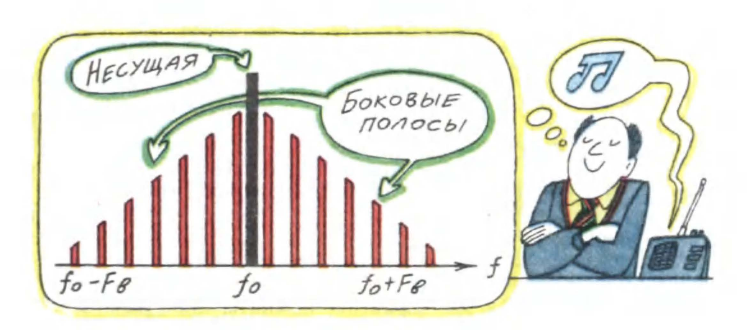
удивляйтесь, услышав на какой-либо частоте одновременно две-три радиостанции. Взаимные помехи ночью резко возрастают, и с хорошим качеством слушать передачи удаленных станций удается нечасто.

В диапазоне КВ также ведутся радиовещательные передачи, и для них выделены специальные участки диапазона: 75 м – 3,95...4,00 МГц; 49 м – 5,95...6,2 МГц; 41 м – 7,16...7,3 МГц; 31 м – 9,5...9,775 МГц; 25 м – 11,7...11,975 МГц.

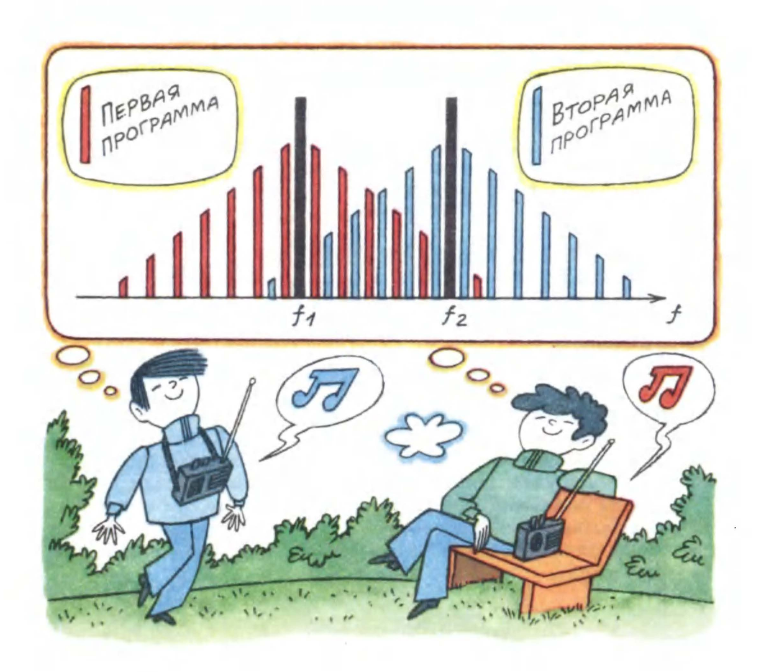
Эти участки установлены отечественным стандартом. На коротких волнах прием ведется, как правило, пространственной волной и хорошего качества воспроизведения музыкальных программ добиться очень трудно из-за замираний сигнала. Сетка частот на КВ установлена с интервалом всего 5 кГц во всем мире, и взаимные помехи между станциями, работающими в совмещенных каналах, могут оказаться очень сильными. Станции, работающие в соседних каналах, также создают чрезвычайно сильные помехи.

Огромное количество радиостанций чрезвычайно затрудняет высококачественное радиовещание в АМ диапазонах. Тесное размещение их частот приводит к тому, что спектры боковых полос перекрываются. Вы, конечно, помните, как выглядит спектр излучаемых радиостанцией частот при амплитудной модуляции. Несущая станции имеет частоту f_0. Верхняя боковая полоса простирается до частоты $f_0 + F_в$, а нижняя – до $f_0 - F_в$, где $F_в$ – наивысшая звуковая модулирующая частота. Отечественные радиостанции передают спектр звуковых модулирующих частот до $F_в = 10$ кГц. Поэтому даже при сетке частот станций с интервалом 9 кГц их боковые полосы сильно перекрываются. Если две соседние по частоте станции создают у приемника примерно одинаковую напряженность поля, то принимать их без взаимных помех невозможно. Только в случае, когда сигнал одной из станций намного сильнее, принимать ее можно с малыми помехами. В результате в диапазонах ДВ и СВ «чисто» принимаются лишь местные радиовещательные станции, да и то преимущественно днем, когда дальнее прохождение отсутствует. На коротких волнах ситуация еще хуже.

Проблема помех в какой-то мере решается при сужении полосы пропускания приемника до 4...6 кГц. Низкочастотные составляющие звукового спектра имеют бóльшую амплитуду, чем высокочастотные, что отображено на рисунках условными треугольниками. Поэтому «вырезая» приемником несущую и прилегающую к ней часть



Спектр сигнала радиовещательной станци при АМ



При существующем распределении частот спектры двух соседних по частоте радиостанций с АМ перекрываются

спектра боковых полос, мы существенно уменьшаем помехи. Часто имеет смысл настроить приемник не по центру спектра желаемой станции, а чуть-чуть сбоку, со стороны наиболее «чистой» от помех боковой полосы. Это и расширит спектр воспроизводимых боковых полос, и уменьшит помехи. Недостаток узкой полосы пропускания приемника очевиден – мы теряем верхние частоты звукового спектра и тем самым ухудшаем качество приема.

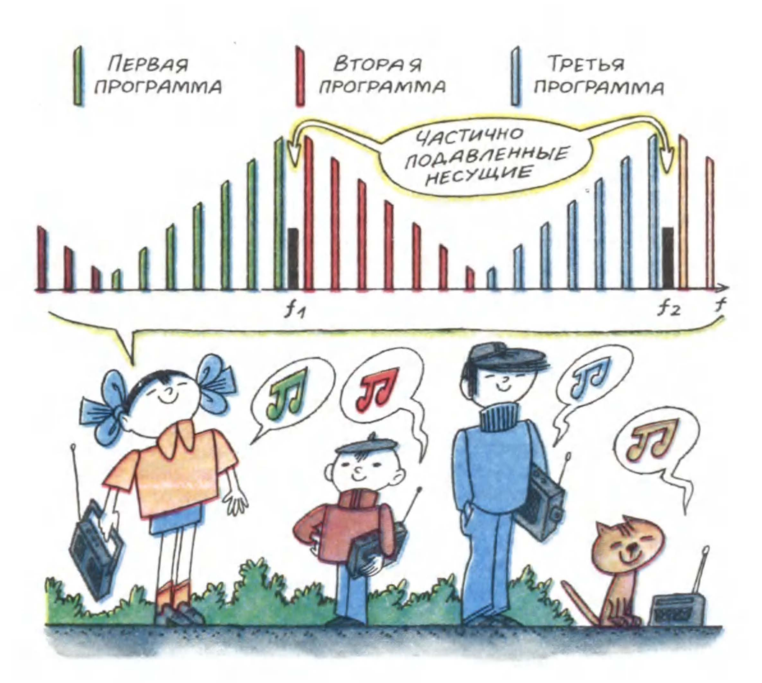
Другие возможности улучшения качества радиовещания в диапазонах ДВ, СВ и КВ состоят в коренной его перестройке. Как мы с вами видели, амплитудная модуляция была предложена на заре радиотехники как самое простое и очевидное решение. Теперь мы много знаем, создали теорию информации, можем сравнивать различные системы передачи по эффективности, помехоустойчивости и другим параметрам. И что же оказалось? Амплитудная модуляция – это самый неэффективный и, я бы сказал даже, расточительный вид модуляции! Подтвердим сказанное простым расчетом. Коэффициент модуляции при реальной речевой или музыкальной передаче в среднем не превосходит $m = 0{,}3$, или 30%. Это необходимо для того, чтобы на пиках сигнала (при наиболее громких звуках) не возникало перемодуляции, приводящей к искажениям. Амплитуда каждой из боковых полос составляет $m/2$, или 0,15 амплитуды несущей, а мощность равна 0,0225 мощности несущей. Это означает, что только 5% мощности излучаемого АМ сигнала несут полезную информацию, содержащуюся в двух его боковых полосах. Остальные 95% мощности приходятся на несущую, которая никакой

информации не несет. Получается парадокс: мы строим мегаваттные радиостанции, а их мощность бесполезно теряется в пространстве.

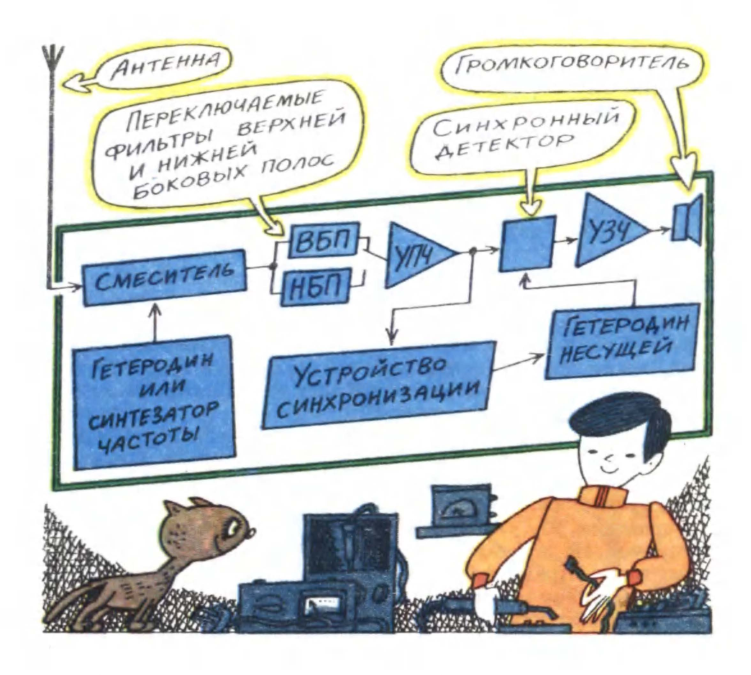
Разумеется, несущая нужна для работы детектора в приемнике, но не слишком ли дорого и расточительно передавать ее через эфир? Ведь несущую можно генерировать и в самом приемнике с помощью маломощного гетеродина. И мы возвращаемся к идее синхронного приема, выдвинутой еще в 20-х годах.

... и перспективы его развития

Синхронный прием не внедрен до сих пор. Хотя были и замечательные исследователи и замечательные разработки. Наш талантливый ученый Е. Г. Момот с группой сотрудников занимался этим вопросом еще в 30-е годы. Его книга «Проблемы и техника синхронного приема» не потеряла актуальности и в наши дни. Любопытна судьба этой книги. Подписанная к выпуску в 1941 году рукопись осталась в блокадном Ленинграде, и все ее экземпляры считались погибшими. Случайно сохранившийся сигнальный экземпляр был обнаружен лишь после войны. Книгу издали в 1961 году без всяких изменений, и сейчас она снова стала библиографической редкостью. А проблемы «упорядочения эфира», перехода на передачу с одной боковой полосой, поставленные в ней, существуют и сегодня.



Распределение частот и расположение спектров при однополосном радиовещании с независимыми боковыми полосами



Структурная схема супергетеродина для приема сигналов с независимыми боковыми полосами и частично подавленной несущей

Международный консультативный Комитет по радио в Женеве принял рекомендации о внедрении однополосного радиовещания. Что же это такое? Станции будут излучать не весь спектр АМ сигнала, а лишь одну боковую полосу. Ведь она содержит всю информацию о передаваемой программе. Причем удобно, размещая спектры станций в эфире, чередовать их нижние и верхние боковые полосы, что позволит вдвое увеличить интервал между несущими. Собственно, на одной несущей будут работать как бы две станции, передающие различные боковые полосы. Передача таким способом названа передачей с независимыми боковыми полосами и частично подавленной несущей. Для приема понадобится особый приемник, оснащенный встроенным гетеродином несущей и очень эффективными фильтрами, позволяющими «вырезать» из принимаемой массы сигналов лишь одну желаемую боковую полосу. Нелишне заметить, что все описанные технические решения уже давно и очень успешно используются в профессиональной радиосвязи.

Начиная с 50-х годов проблема обеспечения населения высококачественным радиовещанием решается и другим путем - путем развития сети УКВ станций. Ультракороткие волны не отражаются ионосферой и распространяются лишь в пределах прямой видимости. Следовательно, одна УКВ станция может обслужить территорию района (максимум – области) радиусом, скажем, 50... 70 км. Казалось бы, это не очень хорошо. Но УКВ диапазон имеет

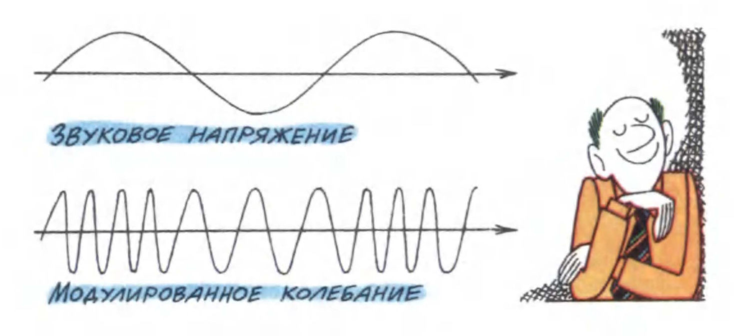
другое важное преимущество – громадную частотную емкость. Отведенный для радиовещания в СССР диапазон 65,8...73 МГц мог бы вместить 800 АМ каналов с разносом частот в 9 кГц. Но АМ неэффективна и потому на УКВ не используется. Применяют более эффективный вид модуляции – частотную, или ЧМ. При такой модуляции в такт со звуковым сигналом изменяется частота излучаемых колебаний, а амплитуда их остается неизменной. Максимальная девиация (отклонение) частоты установлена равной ± 50 кГц. Ширина излучаемого станцией спектра при этом превосходит 100 кГц. Разместить столь широкополосные спектры в диапазонах ДВ, СВ или даже КВ, разумеется, невозможно. Частотная модуляция имеет много важных преимуществ. Во-первых, спектр модулирующих частот (звуковых) удалось расширить до 15 кГц. Это резко повысило качество приема. Во-вторых, и это особенно важно, при ЧМ происходит как бы обмен ширины спектра сигнала на отношение сигнал-шум, т. е. при детектировании относительно «зашумленного» ЧМ сигнала получается сравнительно «чистый» звуковой сигнал. Помехи естественного (грозовые разряды) и искусственного происхождений, особенно импульсного характера, хорошо подавляются приемником сигналов с ЧМ. Все это, вместе взятое, позволяет получать отношение сигнал-шум на выходе приемника примерно 50...70 дБ, что обеспечивает высококачественное радиовещание. Не испугал ли я вас сухими цифрами? На деле это выглядит так: настраиваем приемник на радиостанцию в диапазоне ДВ или СВ. Слышно хорошо, но вместе с передачей прослушивается и шум, а верхних звуковых частот нет (звон колокольчика или тонкий писк просто не воспроизводится). Иное дело в диапазоне УКВ: верхние частоты в воспроизводимом спектре есть, а шума почти не слышно. Слушатели в таких случаях говорят, что передача «идет очень чисто».

Радиовещание на УКВ вполне оправдано в густонаселенных районах. В Москве, например, передачи одной УКВ станции могут одновременно слушать десять миллионов человек!

Следующий шаг в развитии радиовещания – переход к стереофоническим передачам. Согласитесь, что не очень естественно, когда звучание целого оркестра исходит из одной точки – громкоговорителя. Чтобы полностью передать звуковую панораму реальной сцены, необходимо несколько (чем больше, тем лучше) микрофонов, несколько независимых трактов передачи и несколько громкоговорителей. Разумеется, это очень сложно и дорого. Но даже при двух микрофонах и двух громкоговорителях, т. е. при стереофонической системе, получается существенное повышение качества передачи. Такая система и принята сейчас повсеместно. Более сложные системы, например квадрофоническая, распространения не получили, поскольку примерно двукратное усложнение аппаратуры дает лишь небольшой прирост качества звучания по сравнению со стереофонической системой.

Итак, при стереофонии надо передавать уже не один, а два звуковых сигнала. В магнитофонах поступают просто: записывают два канала на две разные дорожки магнитной ленты. А как быть в радиовещании? Строить две радиостанции? Дорого, и к тому же при этом не решается проблема совместимости. Имеется масса радиослушателей с монофоническими приемниками. Настроившись на радиостанцию, ведущую стереофонические передачи, они должны слышать суммарный сигнал левого и правого каналов, а вовсе не один из них.

На УКВ проблему решили следующим образом. Передатчик



Частотная модуляция

Стереофонический УКВ передатчик
УКВ приёмник
Стерео-декодер
УЗЧ
УЗЧ

Стереофоническое радиовещание

модулируют, как обычно, суммарным сигналом левого и правого стереоканалов. Но к модулирующему сигналу добавляют поднесущую, лежащую в ультразвуковом диапазоне (31,25 кГц по отечественному стандарту). Поднесущая, в свою очередь, модулирована разностным сигналом двух стереоканалов. Обычный приемник, настроенный на станцию, ведущую стереопередачи, примет лишь суммарный сигнал. Чтобы принять стереопередачу, приемник оснащают специальным устройством – стереодекодером. Он выделяет сигнал поднесущей, детектирует его, полученный разностный сигнал стереоканалов комбинирует с суммарным так, чтобы получились исходные сигналы двух стереоканалов.

Введение поднесущей расширяет спектр модулирующих частот радиостанции до 46 кГц (31,25 + 15 кГц), поэтому описанная система стереофонического вещания может применяться только на УКВ, где она широко и используется. Предложены и другие системы стереофонического вещания, не требующие расширения спектра модулирующих частот. Они могут применяться даже в диапазонах ДВ и СВ. Одна из таких систем предусматривает излучение двух независимых боковых полос АМ сигнала, причем одна из боковых полос соответствует левому стереоканалу, другая - правому. Обычный двухполосный АМ приемник будет воспроизводить суммарный сигнал двух боковых полос. Но специальный однополосный приемник с синхронным детектором позволит выделить два отдельных сигнала стереоканалов.

На этом главу о радиовещании можно было бы и закончить, если бы .... если бы не внедрение во многие отрасли науки и техники цифровой электроники и космической техники. Цифровая электроника и радиовещание - казалось бы, совсем несовместимые вещи! Но мы уже говорили о том, что цифровая техника используется в синтезаторах частоты задающих генераторов радиопередатчиков. А нельзя ли сделать то же самое и в приемнике? На первый взгляд – сложно и дорого, но только на первый! Стали ведь дешевыми и микрокалькуляторы, и электронные часы, а техника в них ничуть не проще, чем в синтезаторе частоты. Но нужен ли он в приемнике? Давайте разберемся.

Слушая КВ радиостанцию на простеньком приемнике, вы то и дело тянетесь к ручке настройки, чтобы проверить, нельзя ли настроить приемник получше? И очень часто это удается. Частота настройки приемника определяется частотой его гетеродина, а она «плывет», «уходит» при изменениях температуры, напряжения сети или батарей и от многих других факторов. Лишь в диапазонах ДВ и отчасти СВ можно быть уверенным, что уход частоты гетеродина будет невелик: намного меньше ширины полосы пропускания приемника. Поясню сказанное примером. Относительная нестабильность частоты простого гетеродина радиовещательного приемника составляет $10^{-3}...10^{-4}$(0,1...0,01%). Если гетеродин настроен на частоту 1 МГц (в диапазоне средних волн), абсолютный уход его частоты будет не более $10^{-3} \cdot 10^{6}$Гц = 1кГц. При этом сигнал радиостанции еще не выйдет из полосы пропускания приемника, составляющей 4...10 кГц. Но при частоте настройки 10 МГц (в КВ диапазоне 31 м) уход частоты может достигнуть 10 кГц, что приведет к полной потере сигнала станции. Но и значительно меньшие уходы частоты вызывают заметное изменение качества приема

Неизмеримо более высокие требования к стабильности частоты гетеродинов предъявляются при синхронном приеме двухполосных АМ сигналов и при однополосном приеме, когда несущая принимаемого сигнала генерируется в самом приемнике. Исследования

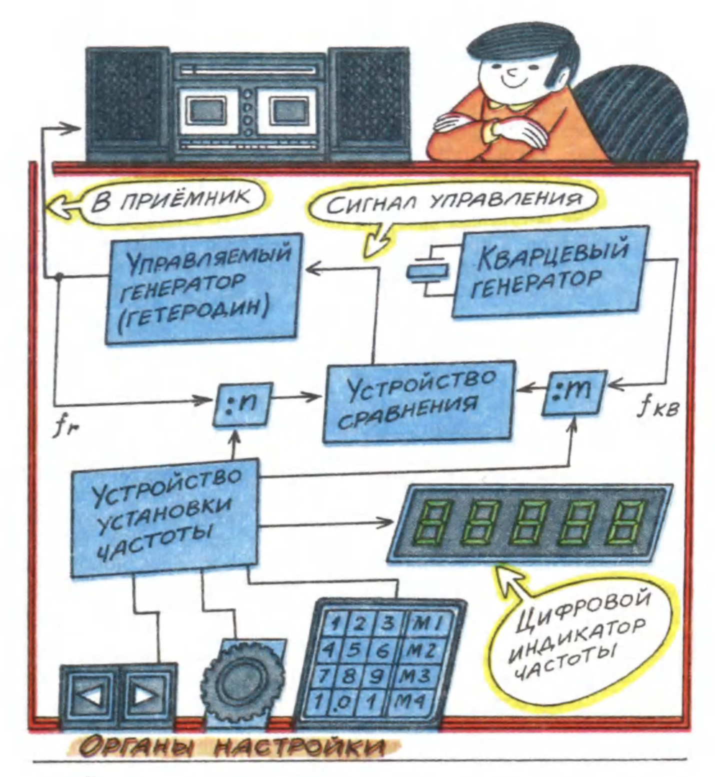
показали, что если при приеме речи еще допустима неточность восстановления частоты несущей в несколько десятков герц, то при приеме музыкальных передач ошибка не должна превосходить 1...1,5 Гц. При синхронном приеме несущая должна восстанавливаться с точностью до фазы, при этом частотная ошибка должна равняться нулю. Такого результата добиваются применением специальных систем синхронизации – фазовой автоподстройки гетеродина по несущей сигнала. Но и для работы этих систем точность предварительной установки частоты должна быть высокой, не хуже нескольких десятков, в крайнем случае – сотен герц. Таким образом, новые, прогрессивные методы радиовещания требуют в первую очередь повышения стабильности частоты и передатчиков, и приемников.

Другая проблема. Наконец-то вы настроились, совершая прогулку по эфиру, на желаемую радиостанцию, скажем Вильнюса (частота 666 кГц – легко запомнить!). Хорошо, что частоту я вам назвал, а то как бы вы ее узнали, глядя на механическую шкалу с толстой стрелкой приемника? Деления на шкале редки, стрелка движется с люфтом, да и указаны на ней не частоты, а длины волн, и то очень приблизительно. Можно ли сделать механическую шкалу с точностью отсчета частоты 1 кГц? Можно, и в профессиональных приемниках это делают. Для диапазона СВ такая шкала должна содержать более 1000 делений, и приемник превратился бы из изделия широкого потребления в прецизионный и очень дорогой в производстве аппарат. Но нам-то как быть? Ведь завтра опять захочется послушать Вильнюс и предстоит новый кропотливый поиск в эфире.

Описанные проблемы сразу решаются, если в приемнике есть синтезатор и шкала с цифровым отсчетом частоты. Рассмотрим структурную схему одного из простейших синтезаторов. В нем два генератора; один – кварцевый, настроенный на стабильную фиксированную частоту, другой – управляемый, с электронной перестройкой в нужном диапазоне. Он и служит гетеродином приемника. Частоты генератора: один – кварцевый, настроенный на стабильную фиксированную частоту, другой – управляемый, с электронной перестройкой управляющий сигнал, подстраивающий гетеродин до тех пор, пока поделенные частоты не совпадут абсолютно точно. Частота гетеродина оказывается равной $f_г = \frac{n}{m} f_{кв}$. Рассмотрим числовой пример: пусть частота кварцевого генератора $f_{кв} = 1000$ кГц, а коэффициенты деления $m = 1000$, $n = 549$. Получаем частоту гетеродина $f_г = 549$ кГц, что соответствует частоте радиостанций второй Общесоюзной программы «Маяк». Изменяя коэффициент деления n, можно получать сетку частот через 1 кГц.

Стабильность частоты синтезатора определяется встроенным кварцевым генератором и может быть сделана достаточно высокой ($10^{-6}...10^{-7}$). Никаких уходов частоты настройки приемника! А глядя на цифровой индикатор шкалы, вы будете знать частоту настройки точно и сможете настроиться на желаемую станцию еще до того, как она выйдет в эфир. Открываются и новые широчайшие возможности. Настройку можно сделать скачками по 9 кГц в диапазонах ДВ и СВ и 5 кГц в диапазоне КВ в соответствии с принятой сеткой частот радиостанций. Можно и вообще отказаться от традиционной ручки настройки и заменить ее двумя кнопками «перестройка вверх» и «перестройка вниз» (по частоте, разумеется).

В приемнике с синтезатором частоты легко ввести и устройство



Синтезатор частоты

автоматической настройки, перестраивающее приемник до тех пор, пока не будет принят сигнал радиостанции. После приема сигнала достаточного уровня перестройка прекращается. Можно, наконец, ввести клавишный набор частоты настройки с помощью такой же клавиатуры, как в микрокалькуляторе. И так же, как в микрокалькуляторе, можно обеспечить запоминание набранной частоты настройки. Имея память на 8, 16 или 32 частоты настройки, уже и набирать на клавиатуре ничего не потребуется – достаточно будет нажать лишь номер нужной ячейки памяти. Клавиатуру набора частоты не обязательно размещать в самом приемнике, ведь она непосредственно не связана с гетеродином. Легко осуществляется дистанционное управление приемником с выносной клавиатуры, связанной с приемником кабелем, ультразвуковой или инфракрасной линией передачи.

Все, что здесь рассказано,– вовсе не техника будущего. Это есть уже сегодня и используется в большинстве современных профессиональных и некоторых полупрофессиональных приемниках. Есть приемники, в которых управление синтезатором осуществляет микропроцессор. Возможностей у них еще больше. Ими можно управлять дистанционно по телефонной линии и по программе, заложенной в памяти.

Особый интерес вызывает возможность использования микропроцессора для фильтрации сигнала, т. е. выделения его из множества мешающих сигналов и шумов эфира. Цифровые фильтры могут иметь характеристики, намного превосходящие характеристики обычных, аналоговых фильтров. Возможно, например, получение практически идеально прямоугольной АЧХ. Такой фильтр пропустит только спектр полезного сигнала, а все другие сигналы почти полностью подавит. В цифровом фильтре входной аналоговый сигнал сначала преобразуется в цифровую форму, затем обрабатывается микропроцессором, а далее снова преобразуется в аналоговую форму. В некоторых приемниках специального назначения, в частности радиолокационных, цифровые устройства обработки сигналов уже используются. Время внедрения цифровых фильтров в радиовещательные приемники пока, видимо, еще не наступило.

Более того, сами передаваемые сигналы в радиовещании по-прежнему остаются аналоговыми. Помните, как цифровые способы передачи позволили повысить качество телефонной связи? Нельзя ли то же самое сделать и в радиовещании: преобразовать передаваемую программу в поток цифровых сигналов и так излучать ее в эфир? Накопить в памяти больших ЭВМ, восстановить (регенерировать), если она искажена помехами? Разумеется, можно! И инженеры сейчас уже работают в области цифрового радиовещания. Переход к цифре сулит необыкновенное улучшение качества звуковоспроизведения: нелинейные искажения менее одной тысячной процента и отношение сигнал-шум более 90 дБ становятся реальностью. На практике это означает, что человек, закрыв глаза, не сможет отличить звук, передаваемый по радио, от звука, непосредственно приходящего со сцены. Но проблем предстоит решить еще очень много. Для цифровой передачи необходима очень широкая полоса частот, и вещание возможно лишь в диапазонах метровых, дециметровых и сантиметровых волн. Техника цифрового радиовещания разрабатывается в нашей стране с 1982 года. К настоящему времени уже подготовлена экспериментальная система цифрового вещания для Ленинграда и Таллина. Предполагается, что один передатчик, используя технику цифрового уплотнения каналов, будет передавать пять стереопрограмм или 10 монофонических программ на одной несущей. Сигнал будет приниматься коллективной антенной, оснащенной коллективным приемником, установленным, скажем, в подъезде вашего дома. Оконечные устройства приемника, установленные в каждой квартире, позволят радиослушателям выбрать из пяти программ любую желаемую. Благодаря использованию интегральной техники оконечные устройства получаются сравнительно недорогими, но, несмотря на это, обеспечивают радиослушателям дополнительные сервисные удобства. Техника развивается быстро, и вполне возможно, что через несколько лет цифровое стереофоническое радиовещание станет обыденным явлением!

Теперь несколько слов о космической технике. Повышение качества радиопередач требует применения частотной модуляции или цифровых способов передачи. Но это возможно только на УКВ, которые не огибают сферическую поверхность Земли, и поэтому радиус действия УКВ передатчиков резко ограничен. А не поднять ли передатчик на искусственный спутник Земли? Тогда он осветит почти половину земного шара! Подобная задача уже вполне по плечу современной космической технике.

Излучение со спутника выгодно еще и тем, что сигнал к слушателю приходит сверху, становятся ненужными высокие антенны, резко уменьшаются зоны «затенения» сигнала высокими здания-

ми, холмами и другими неровностями рельефа. Конечно, и здесь много своих проблем. Выбор орбиты, например. Если использовать спутники на низких эллиптических орбитах, то для непрерывного вещания нужно несколько спутников. Один будет работать, пока другие за горизонтом. Очень привлекательно расположение спутника на геостационарной орбите, проходящей на высоте 36 000 км над поверхностью Земли. Период обращения такого спутника в точности равен земным суткам. Вращается Земля, и вращается спутник. В результате земному наблюдателю кажется, что спутник постоянно «висит» над одной и той же точкой поверхности. Правда, точка эта находится на экваторе. Поэтому геостационарный спутник виден низко над горизонтом в северных районах нашей страны, зато на нем можно установить большие направленные антенны и обслуживать радиовещанием только определенные участки поверхности Земли. По-видимому, проблема спутникового радиовещания будет решаться в ближайшие годы комплексно, вместе с развитием спутникового телевидения, о котором мы узнаем в следующих главах.

7. ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Здесь речь пойдет о волшебном зеркальце и волшебном барабане, диске с дырками, стеклянных трубках с магнитными полями и «космически» быстрыми частицами, об умножении этих частиц, о телебашнях, антеннах и частотной модуляции, о цветоразностных сигналах и цветоделительных масках, светящихся кристаллах и разноцветных сигналах, а также о многом-многом другом, что встречается в телевидении.

Как передать изображение?

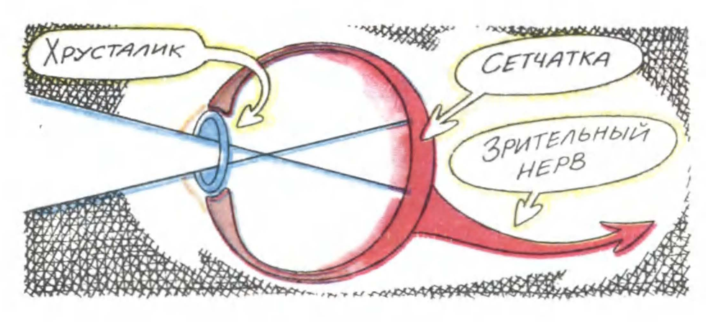
Вообще-то, нет ничего проще – сходите в фотоателье, сфотографируйтесь и передайте свою фотокарточку кому хотите! Объект вашей благосклонности далеко? Пошлите по почте. Может случиться так, что не пройдет и года, как ваше фото окажется в нужных руках. Но только не подумайте, что я иронизирую над работой нашей почты. Ничего подобного! Просто есть места, куда пароходы ходят два-три летних месяца, самолеты летают месяца три-четыре в год, а все остальное время, когда океан покрыт льдом или штормит, а аэродром заметен снегом, связь осуществляется только по радио. Как же передать фото? Но зачем говорить об окраинах страны – вам надо передать, и очень срочно, чертежи на завод в соседнем городе. Как быть? Изобретения появляются, как правило, тогда, когда в объекте изобретения возникает насущная необходимость. И фототелеграф был изобретен. Это еще не телевидение: по фототелеграфу передают только неподвижные изображения, например изображение газетных полос. Зато жители Камчатки читают центральные газеты одновременно с москвичами. Так как же все-таки передают изображение?

Любое изображение можно представить совокупностью точек – элементов изображения. Всмотритесь повнимательнее в любую газетную фотографию, видите, что она состоит из мелких точек?

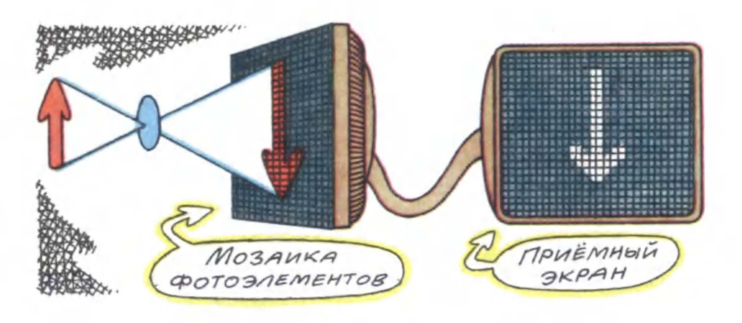
Вооружитесь лупой, и вы увидите точки совершенно отчетливо. Но что значит увидите? Анатомы давно установили, что глаз человека содержит оптическую систему: собирающую линзу – хрусталик и светочувствительную оболочку – сетчатку. На нее проецируется изображение предмета (заметим, что «вверх ногами», но это неважно – мозг воспринимает такое изображение ничуть не хуже). Сетчатка состоит из множества светочувствительных элементов – рецепторов, палочек и колбочек, названных так по их внешнему виду, наблюдаемому под микроскопом. Светочувствительность палочек очень велика: они дают возможность видеть в сумерках. Чувствительность колбочек ниже, но зато они позволяют различать цвета и обеспечивают большую четкость изображения. «Сигналы» рецепторов предварительно обрабатываются нервными клетками сетчатки и передаются «многоканальным» зрительным нервом в головной мозг, где и происходит окончательная «обработка» изображения – формирование образов, коррекция, узнавание и т. д. Глаз представляет собой на удивление совершенный прибор. Помимо таких достоинств, как автоматическая наводка на резкость, автоматическая регулировка светочувствительности, он обладает отличной разрешающей способностью: около одной угловой минуты в центре поля зрения. Для получения столь высокого разрешения число колбочек в середине сетчатки достигает 180 000 на квадратный миллиметр! Итак, в глазу отдельные элементы изображения возбуждают различные рецепторы и сведения об освещенности рецепторов передаются по параллельным каналам в мозг.

Точно так же и в технике передачи изображений необходимо освещенность каждого элемента преобразовать в электрический сигнал, усилить и передать по линии связи, а затем снова преобразовать в свет. Именно так и действовала первая телевизионная система, которую изобрел Дж. Керри в 1875 году. Изображение проецировалось на мозаику селеновых фотоэлементов, каждый из которых соединялся проводником с лампой на приемном экране. Сопротивление селена уменьшается при освещении, и соответствующая лампа загорается ярче. В результате на приемном экране появляется мозаичное изображение передаваемого объекта. В системе Керри для достижения четкости современного телевидения требуется около полумиллиона проводов или каналов связи.

Техника пока не может пойти на такие затраты. Поэтому во всех последующих системах передачи изображения использована идея развертки. Фототелеграф передает информацию о каждом элементе изображения последовательно. С этой целью исходное изображение



Устройство глаза



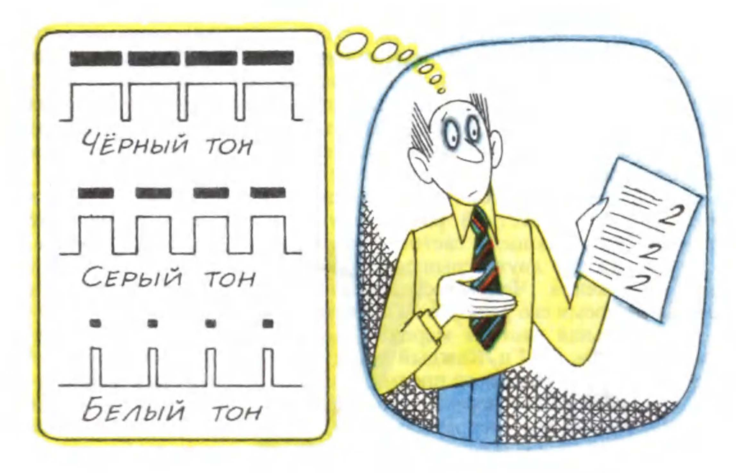
Система с параллельной передачей элементов изображения

накладыают на барабан, вращающийся с определенной скоростью. Фотоэлемент, снимающий информацию о «степени черноты» элемента, медленно перемещается параллельно оси барабана. «Поле зрения» фотоэлемента очень мало: оно сфокусировано линзой до размеров элемента изображения и описывает на поверхности бара-

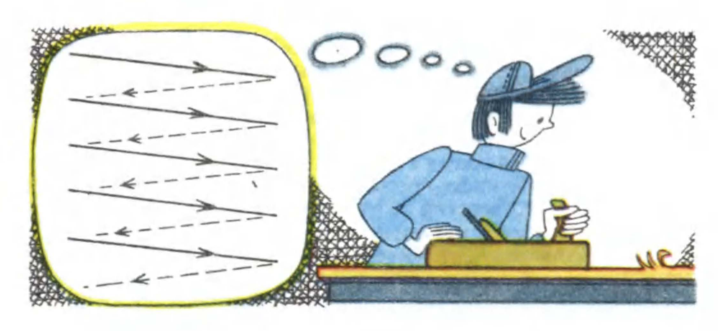
Фототелеграф

бана винтовую линию, последовательно «осматривая» все элементы изображения. Сигнал фотоэлемента усиливается и передается к корреспонденту по проводам или по радио. У корреспондента имеется точно такой же барабан, на котором перо оставляет черный след. Приемный барабан вращается строго синхронно с передающим, а перо, так же как и фотоэлемент, медленно перемещается вдоль оси барабана.

Если в поле зрения фотоэлемента входит черный элемент изображения, перо оставляет след, если белый – перо отводится от приемного барабана, и бумага, закрепленная на его поверхности, остается белой. Так можно передавать чертежи и графики. Но как передавать полутона? Тем более что газеты печатают с клише, которые полутонов не терпят: либо клише оставит след типографской краски, либо – нет. Поступают просто: в зависимости от «черноты» элемента изображения изменяют продолжительность касания пера к бумаге. Из рисунка видно, как выглядит почти черный тон изображения, переданного по фототелеграфу. Сигнал поступает с небольшими перерывами, и перо чертит почти сплошной след. При передаче



Фототелеграфные сигналы



Развертка плоского изображения

серого тона длина штрихов сравнима с длиной пробелов. При передаче светлого тона сигнал поступает в виде коротких импульсов и перо оставляет короткие штрихи. Рядом показаны соответствующие телеграфные сигналы.

Не будем далее останавливаться на технике фототелеграфа, отметим главное: чтобы передать изображение, надо его «развернуть», «разложить» на элементы. Чем мельче элементы, тем четче воспроизводится изображение. Давайте снимем с фототелеграфного аппарата лист с изображением и положим его на стол, на плоскость. Это переданный «кадр». На нем видны «строки» – следы поля зрения фотоэлемента в передатчике и пера в приемнике. Штриховыми линиями показан «обратный ход». В фототелеграфном аппарате его нет, поскольку изображение свернуто в цилиндр. А если мы хотим передавать плоское изображение, обратный ход обязательно будет. Итак, первый принцип, лежащий в основе телевидения, – принцип развертки – нам ясен. Обратимся теперь ко второму принципу и назовем его условно «принципом кино».

А как передать движущееся изображение?

Братья Люмьер, изобретатели кинематографа, вряд ли могли представить себе бурное развитие своего детища в нашем веке. И тем более трудно было представить, что у кино появится очень сильный конкурент – телевидение.

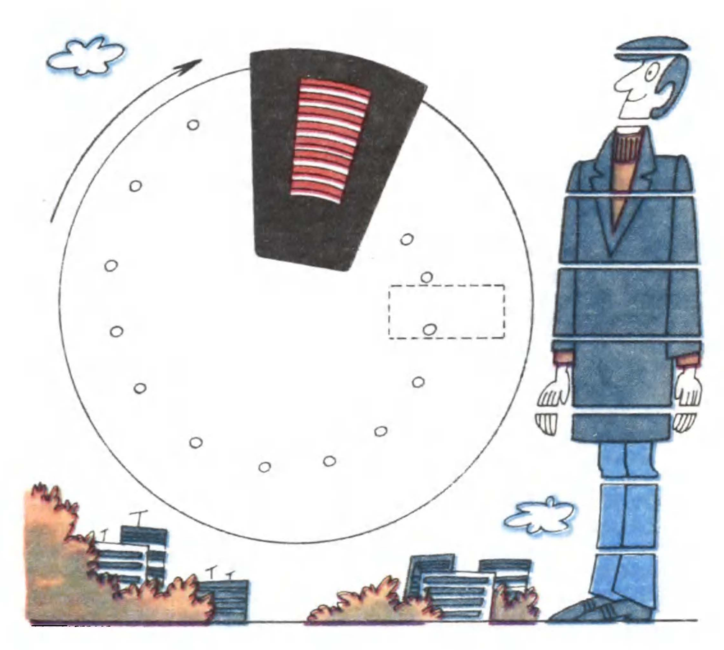
Принцип кино состоит в частой смене изображений. Экран в кинотеатре вспыхивает 48 раз в секунду благодаря обтюратору (затвору), открывающему световой поток, и столько же раз гаснет. Во время каждых двух вспышек с кинопленки проецируется один кадр изображения. Человеческий глаз не способен заметить эти мелькания – время его реакции на свет составляет около 0,1 с, поэтому максимальная частота мерцаний, еще замечаемых глазом, не превосходит 10...12 Гц. Каждый последующий кадр воспроизводит ту же сцену, но движущиеся предметы на нем уже слегка переместились. Эти небольшие перемещения при быстрой смене кадров и воспринимаются как непрерывное движение. Теперь становится ясно, как можно передать на расстояние движущееся изображение. Надо передавать не менее 10...12 кадров в секунду (принцип кино). Но каждый кадр надо еще преобразовать в последовательность сигналов, соответствующих элементам изображения (принцип развертки)!

Именно таким путем и шли первые изобретатели телевидения, и принципы, заложенные ими, сохранились до настоящего времени. Изменилась только техника передачи и приема движущихся изображений. В первых опытах использовали механическую развертку изображения. Вот, например, диск П. Нипкова – немецкого инженера, получившего в 1884 году в Германии патент на «оптико-механическое устройство». В диске по спирали Архимеда просверлен ряд отверстий. Диаметр отверстий соответствует размеру элемента изображения. А само изображение сцены проецируется объективом на верхнюю часть диска с ограничительной рамкой. Ширина кадра соответствует расстоянию между соседними отверстиями, а высота – шагу спирали. Кадр, ограниченный рамкой, изображен в верхней части диска. Строки в этом кадре горизонтальны, как и в современном телевидении, но применялись системы и с вертикальными

строками. Рамка в этом случае располагалась на боковой стороне диска, как показано на рисунке штриховыми линиями. Если диск быстро вращать, то первое отверстие прочерчивает первую строку, и, когда оно выходит за кадр, второе отверстие развертывает другую строку, и так далее, пока не будет развернут весь кадр.

Теперь посмотрим, как устроена система механического телевидения 30-х годов. Объектив проецирует изображение сцены на рамку и вращающийся позади нее диск, а за диском установлен фотоэлемент. Ток фотоэлемента пропорционален освещенности данного элемента изображения, и на выходе фотоэлемента при развертке появляется так называемый видеосигнал, напряжение которого пропорционально освещенности.

Развертка изображения осуществлялась всего на 30 строк. Столько же отверстий было и в диске Нипкова. Строка содержала 40 элементов. Следовательно, изображение кадра разбивалось всего на 1200 элементов. Видеосигнал модулировал несущую телевизионной станции по амплитуде и излучался в эфир. В приемнике, выполненном так же, как и радиовещательный, сигнал усиливался и детектировался. Продетектированный видеосигнал (он точно такой же, как и после фотоэлемента в передатчике) поступал на неоновую лампу с плоским катодом, освещавшую экран, за которым вращался точно такой же диск Нипкова. Вращение дисков на радиостанции и в приемнике строго синхронизировалось. С этой целью в паузах между кадрами передавались синхронизирующие импульсы, управляющие вращением мотора в приемнике.



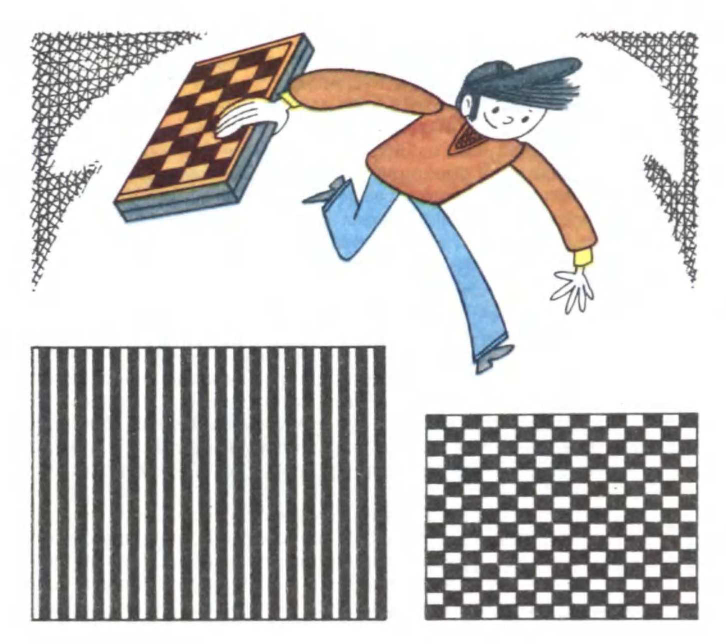
Диск Нипкова

Впечатление от первых телевизионных опытов было огромным. Представьте себе большой корпус (ящик, как тогда говорили) с экранчиком величиной со спичечную коробку. Включили. Взревел мотор, набирая обороты, гудение стало выше тоном, и вот уже, набрав номинальные обороты, высоко запел мотор и зашелестел быстро вращающийся диск. Вы с волнением прильнули глазом к оранжевому окошечку-экрану. Сначала вы ничего не различаете, кроме мелькающих полос: это мотор еще не вошел в синхронизм – в ряде приемников синхронизма добивались вручную, нажимая пальцем на вращающийся диск сквозь специальное окошко в корпусе. Затем движение полос замедляется, останавливается и вы различаете какую-то смутную тень – человека! Он шагнул, поднял руку. Вы все видите. Это ли не чудо?! Вероятно, так и воспринимались первые телевизионные передачи из Москвы в конце 30-х годов. Вы удивитесь, вероятно, если узнаете, что велись они на длинных волнах и принимать телепередачи можно было за многие сотни, а то и тысячи километров. «Но как же это возможно?» – спросите вы. Чтобы ответить на вопрос, почему возможно длинноволновое телевидение и почему его теперь нет, давайте немного посчитаем. Ничего, кроме знания арифметики и тех начал теории информации, о которых вы уже читали в этой книге, нам не потребуется.

Немного арифметики

Итак, мы передаем 30 строк изображения в одном кадре и по 40 элементов изображения в каждой строке. Всего в кадре 1200 элементов. Чтобы картинка не мелькала, будем передавать, как это делалось в малострочной электромеханической системе телевидения, 12,5 кадров в секунду. Итого получается $1200 \cdot 12{,}5 = 15\,000$ элементов изображения в секунду. Какова же при этом частота видеосигнала? Она максимальна при передаче изображения, состоящего из 20 черных и 20 белых вертикальных полос, чередующихся между собой. При развертке такого изображения получается видеосигнал в виде меандра (прямоугольных колебаний) с частотой 7500 Гц. Воспроизводить крутые фронты такого сигнала нет необходимости: все равно круглое отверстие диска Нипкова, пробегая мимо полосы изображения, смажет края. Значит, достаточно передать только основную частоту такого видеосигнала 7,5 кГц. Такая же высокая частота видеосигнала получается и при передаче изображения «шахматной» доски, содержащей 600 белых и столько же черных квадратов. Все другие изображения дадут видеосигнал, изменяющийся медленнее, а следовательно, и содержащий меньшие частоты.

Итак, надо передать спектр видеосигнала шириной 7,5 кГц. Но это же звуковой спектр! И любая радиовещательная станция пригодна для передачи телевизионных изображений. Другое дело, что четкость этих изображений никакой критики не выдерживает, даже диктора узнать нельзя! Чтобы повысить четкость, надо перейти к электронному телевидению. По современному отечественному стандарту кадр развертывается 625 строками по 820 элементов в строке (ширина кадра составляет четыре третьих его высоты). За одну секунду передается 25 кадров. Видеосигнал займет спектр шириной почти 6,5 МГц. Для его передачи не хватило бы ДВ, СВ и половины КВ диапазона, вместе взятых. Поэтому современные телецентры ведут передачи только на УКВ, где еще есть запас по частоте. Осваивается диапазон дециметровых волн (ДМВ), а в недалеком



Сцены, дающие максимальную частоту видеосигнала

будущем ожидается переход и на сантиметровые волны, но последнее уже связано с непосредственным телевизионным вещанием со спутников Земли.

Электронно-лучевая трубка

С удовольствием просматривая мультфильм «Ну, погоди!», вы вряд ли задумывались о том, как устроен телевизор, а тем более передающий телецентр.

Рождение электронного телевидения началось с изобретения электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Она и явилась тем «волшебным зеркальцем», которое, как в сказке, показывает нам весь мир.

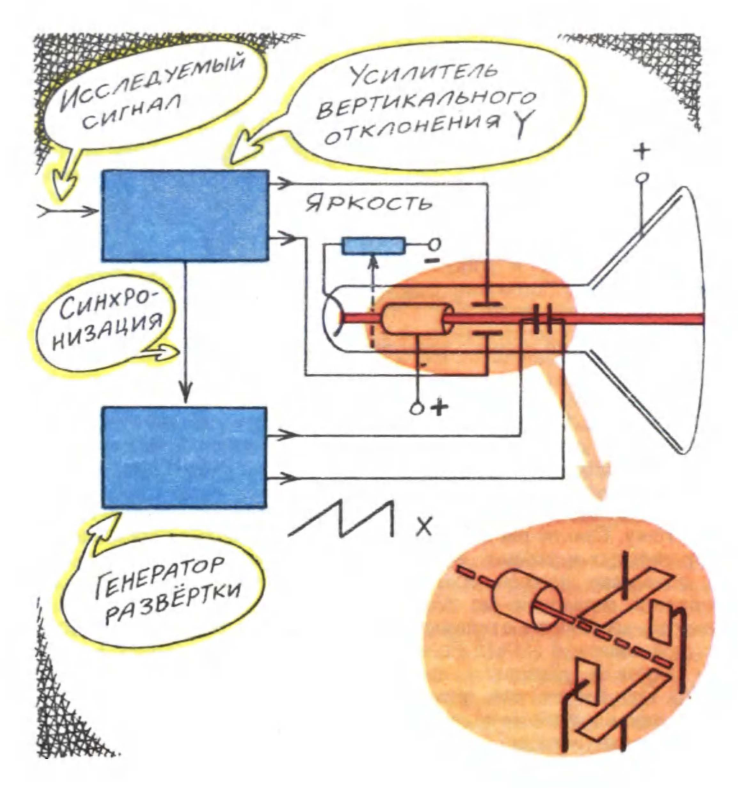
Основные идеи, заложенные в конструкции ЭЛТ, сформулировал еще в 1907 году профессор Петербургского университета Б. Л. Розинг. Однако лишь в 30-х годах появились приемные трубки – кинескопы – с магнитной фокусировкой луча, дававшие удовлетворительную четкость изображения. Первые передачи электронного телевидения начались в нашей стране с октября 1938 года. Изображение развертывалось на 243 строки при 25 кадрах в секунду, что давало намного более четкое изображение по сравнению с электромеханической системой, которая, кстати, еще функционировала. Передачи велись на УКВ по одной программе. Прерванные войной передачи возобновились в 1946 году в Москве и Ленинграде. Был принят новый, современный телевизионный стандарт с разложением изображения на 625 строк.

Так что же представляет собой ЭЛТ? Стеклянная колба, из которой откачали воздух. В горловине – катод, выполненный в виде металлического цилиндра с вмонтированной внутри нитью накала. По ней пропускают электрический ток, нагревая катод до оранжевого свечения. Происходит термоэлектронная эмиссия: так же как и в радиолампе, катод испускает электроны. Около катода, как и в радиолампе, расположена управляющая сетка. Подавая на нее отрицательный относительно катода потенциал, можно регулировать количество электронов, пролетающих сквозь нее к экрану. В результате, забегая вперед, скажем, что от этого зависит яркость свечения экрана. Далее расположена довольно сложная конфигурация металлических цилиндров – ускоряющий и фокусирующий электроды. Их часто называют первым и вторым анодами. Эти электроды разгоняют электроны по направлению к экрану и «сжимают» электронный поток в узкий луч таким образом, чтобы на поверхности экрана диаметр луча был минимален. Обычно он составляет доли миллиметра. Естественно, что для ускорения электронов первый и второй аноды должны иметь положительный потенциал относительно катода. Ну а чтобы электроны не оседали на них, электроды выполнены в виде цилиндров, по оси которых и проходит луч.

Теперь посмотрим на ЭЛТ с другой стороны, а именно с той, с которой на нее обычно смотрят, т. е. со стороны экрана. Экран изнутри покрыт белым составом – люминофором. Он обладает способностью светиться при ударе в него электронов. Почему он светится? Быстро движущийся электрон несет некоторую кинетическую энергию. Попав в вещество, он отдает ее первому попавшемуся на пути атому. Атом переходит в возбужденное состояние, но долго оставаться в нем не может, ибо все в природе стремится к равновесию, т. е. к состоянию с минимальной энергией. Возвращаясь в равновесное состояние, атом отдает избыток энергии в виде кванта света. Явление люминесценции распространено в природе. Может быть, темной ночью в лесу вы видели, как светятся гнилушки. Их свет даже чем-то напоминает свечение экрана ЭЛТ. Атомы соединений фосфора, образующегося при гниении дерева, возбуждаются в результате химических реакций (так называемая хемилюминесценция), а отдают энергию с квантами света.

Чтобы экран ЭЛТ светился ярче, электроны нужно разогнать до большой скорости. Этому служит третий (и последний) анод ЭЛТ, образованный графитовым покрытием на стенках колбы вокруг экрана. Да и сам экран приобретает потенциал третьего анода. Ускоряющее напряжение небольших трубок обычно бывает около нескольких киловольт, а для больших цветных телевизионных трубок достигает 25 кВ. Знающие физику могут самостоятельно оценить, какую скорость приобретают электроны под воздействием ускоряющей разности потенциалов 25 кВ. Ответ удивит вас: скорость электронов окажется около 100 000 км/с, т. е. около трети скорости света! Вот какие огромные скорости существуют за обычным телевизионным экраном!

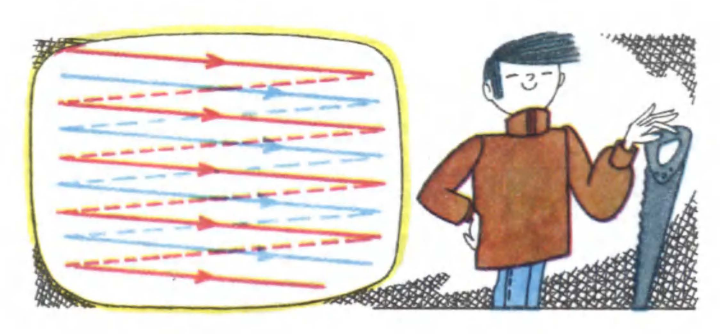
Но зажечь на экране одну светящуюся точку мало, надо еще и передвигать луч по экрану. Это делает отклоняющая система, надетая на горловину трубки. Есть трубки с электростатическим отклонением луча. В них помещены две пары пластин, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Одна пара пластин отклоняет луч по горизонтали, другая – по вертикали. Чем большая разность потенциалов подана на отклоняющие пластины, тем сильнее отклоняется луч, разумеется, в сторону положительно



Электронный осциллограф

заряженной пластины – ведь электроны несут отрицательный заряд. Трубки с электростатическим отклонением луча широко применяются в осциллографах – приборах, предназначенных для наблюдения формы электрических колебаний. Поскольку ни одна сколько-нибудь серьезная работа в области радиоэлектроники сегодня немыслима без осциллографа, кратко остановимся на его устройстве.

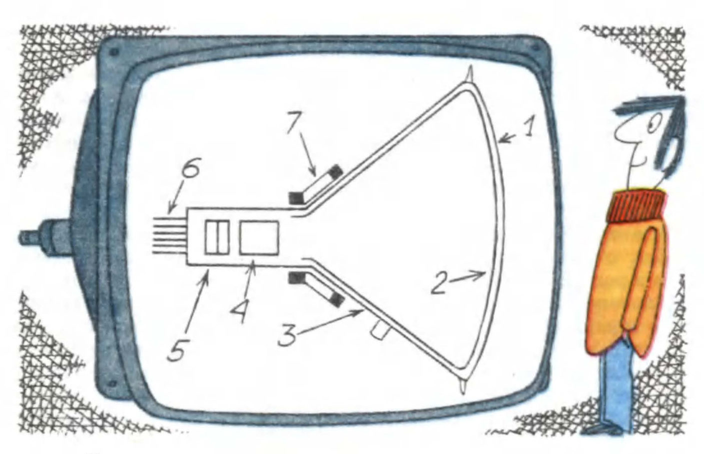
Исследуемый сигнал через усилитель подается на пластины, отклоняющие луч по вертикали (пластины *Y*). На пластины горизонтального отклонения (пластины *X*) от специального генератора подается напряжение развертки – напряжение, изменяющееся по пилообразному закону. По мере нарастания пилообразного напряжения луч на экране трубки перемещается слева направо, прочерчивая горизонтальную ось – ось времени. Но если в то же самое время на *Y*-пластины действует исследуемый сигнал, то траектория луча будет в точности соответствовать этому сигналу. Осциллограф пригоден только для наблюдения периодических сигналов, причем генератор развертки синхронизируют исследуемым сигналом, чтобы каждый цикл развертки воспроизводил одну и ту же часть периода или несколько периодов сигнала. Человеческому зрению смена циклов развертки незаметна, и он видит неподвижную фигуру, соответствующую форме сигнала. Нелишне заметить, что осциллограф – это



Телевизионный растр с чересстрочной разверткой

глаза инженера. Осциллограф позволяет оценить искажения сигнала, измерить его амплитуду, длительность, установить наличие или отсутствие – одним словом, провести почти полную диагностику исследуемого аппарата или системы.

В телевидении изображение на экране ЭЛТ создается совсем по-другому. Оно не рисуется лучом, а появляется как определенный набор светлых и темных участков кадра. Следовательно, луч ЭЛТ при развертке должен обежать всю поверхность и нужны два генератора развертки – по строкам и кадрам. Генератор строчной развертки заставляет отклоняться луч по оси *X*, причем с довольно большой частотой (15 625 Гц в отечественных телевизорах). Генератор кадровой развертки имеет значительно меньшую частоту (50 Гц). При совместном действии обоих генераторов луч перемещается по экрану слева направо и, прочерчивая первую строку, быстро возвращается обратно, в начало второй строки, и т. д. Когда

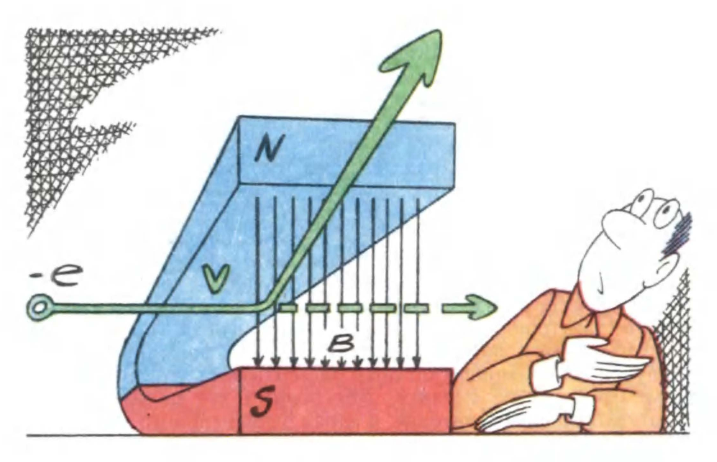


Кинескоп:
1 – экран; 2 – люминофор; 3 – анод; 4 – управляющий и фокусирующий электроды; 5 – катод; 6 – цоколь; 7 – отклоняющие катушки на горловине кинескопа

прочерчена последняя строка, напряжение генератора кадровой развертки скачком изменяется и луч возвращается к началу – в верхний левый угол экрана. То, что он нарисовал на экране, называют растром. Включите телевизор без антенны или на том канале, где нет телепередач, и вы увидите чистый белый растр. Чтобы растр превратился в изображение, луч надо модулировать в процессе развертки по яркости, делая его интенсивнее в светлых местах изображения и ослабляя – в темных.

Внимательный читатель мог усмотреть одну неточность в предыдущем абзаце: раньше я говорил, что телевизионная передача ведется с разверткой 25 кадров в секунду, а частоту генератора кадровой развертки назвал 50 Гц. Противоречия здесь нет. Чтобы экран меньше мерцал, используют чересстрочную развертку. При этом луч сначала прочерчивает все нечетные строки, а затем, между ними,– четные. Принципиально от этого ничего не меняется, только частота кадровой развертки повышается вдвое и смотреть на такой экран менее утомительно. Но не думайте, что просмотр телевизионных передач (как и кино) – это отдых. Ваш зрительный нерв напряженно работает, заполняя пробелы между кадрами (которых вы поэтому и не замечаете), мелькания сильно радражают его. Не рекомендуют сразу после просмотра телепередачи или кинофильма садиться за руль автомобиля, поскольку ваша зрительная реакция понижена. Надо выждать полчаса – час.

В телевизионных приемных ЭЛТ отклоняющих пластин нет. Дело в том, что трубки с электростатическим отклонением не могут обеспечить отклонение луча на большой угол. В результате длина трубки получается гораздо больше диаметра экрана. В осциллографах с этим мирятся, а вот телевизор стремятся сделать пошире и потоньше. Разработаны трубки с углом отклонения луча 70 и даже 110°. Это совсем короткие и широкие трубки с большим прямоугольным экраном. Луч в них отклоняется магнитным полем. Ведь электронный луч представляет собой направленное движение зарядов, т.е. электрический ток. На ток в магнитном поле действует сила, пропорциональная индукции поля и току. Х. Лоренц давным-



Отклонение заряженной частицы магнитным полем

давно установил формулу для силы, действующей на заряженную частицу, летящую в магнитном поле:

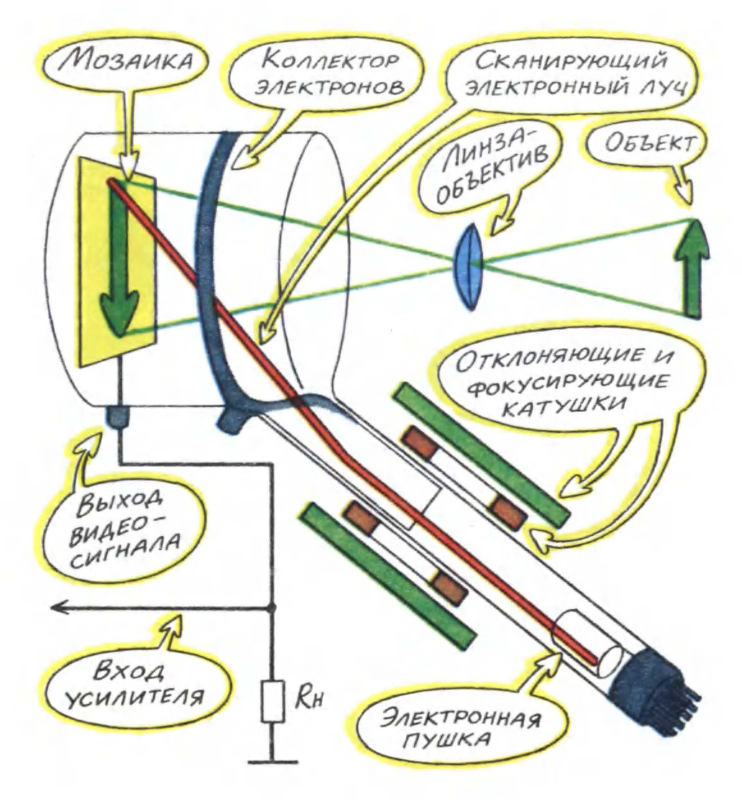
$$F = eVB,$$

где e – заряд частицы; V – ее скорость; B – индукция поля. Сила перпендикулярна направлению полета частицы (электрона) и перпендикулярна направлению поля. Если у вас есть постоянный магнит, проведите любопытный опыт. Поднесите магнит к экрану работающего телевизора и посмотрите, как исказится изображение! Это магнитное поле искривило траекторию полета электронов. Только не надо делать этот опыт с цветным телевизором: детали трубки могут намагнититься и нарушится сведение цветов. А с черно-белым телевизором опыт вполне безопасен.

Итак, для отклонения луча по строке магнитное поле надо направить сверху вниз. Оно создается парой катушек сверху и снизу горловины трубки – строчными отклоняющими катушками. Аналогично, только по бокам горловины трубки, расположены кадровые отклоняющие катушки. Ток пилообразной формы в отклоняющих катушках изменяется по линейному закону с частотой строк и кадров, а растр образуется точно так же, как было описано выше. Телевизионные приемные трубки с магнитным отклонением называют кинескопами.

Современное электронное телевидение

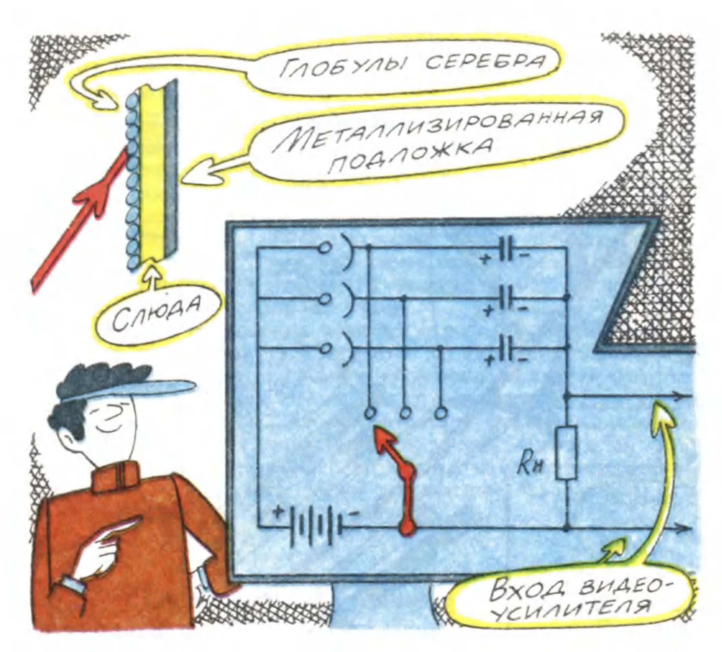
Чтобы посмотреть телепередачу, одного кинескопа мало, нужны еще телевизор – устройство достаточно сложное и телецентр, из которого ведутся передачи. Вы, разумеется, видели, что операторы в студии пользуются телекамерами – устройствами для преобразования изображения в видеосигнал. Основу телекамеры составляет передающая телевизионная трубка. Исторически первыми были иконоскопы. Термины «кинескоп» и «иконоскоп» предложил В. Зворыкин, один из первых изобретателей электронного телевидения. Они образованы от греческих слов «движение», «изображение» и «смотрю». Преобразователем изображения в электрический сигнал в иконоскопе служит мозаика фоточувствительных глобул серебра, нанесенных на слюдяную пластинку и изолированных друг от друга. Обратная сторона пластины металлизирована. На мозаику с помощью объектива фокусируется изображение. Там, где освещенность велика, кванты света выбивают из атомов серебра электроны (происходит фотоэлектрический эффект), и это место мозаики приобретает положительный заряд. Там же, где освещенность мала, фотоэффект слаб и заряд тоже невелик. За время передачи кадра заряд накапливается в элементарных конденсаторах, одна обкладка которых образована глобулой серебра, а другая, общая,– металлизированной подложкой слюдяной пластины. Таким образом, распределение заряда на поверхности мозаичной пластины в точности соответствует оптическому изображению. Теперь заряд надо «считать». Делает это электронный луч. Электронная пушка, содержащая катод, ускоряющий и фокусирующий электроды, формирует электронный луч, а отклоняющие катушки развертывают его по строкам и кадрам. Пробегая по мозаике, электронный луч замыкает цепь «мозаика – вход видеоусилителя», и заряд элементарного конденсатора стекает через высокое (несколько мегаом) сопротивление нагрузки, создавая на нем напряжение видеосигнала. Электронный луч



Устройство иконоскопа

в данном случае подобен коммутатору, условно показанному на рисунке в виде переключателя. Таким способом с мозаики иконоскопа и считывается видеосигнал.

Иконоскопы уступили позиции более чувствительным и совершенным передающим телевизионным трубкам. К ним относятся суперортиконы, видиконы и некоторые другие. Но прежде чем рассказывать об их устройстве, следует сказать несколько слов о принципе фотоумножения, который в них часто используется. Обычный фотоэлемент под воздействием энергии света генерирует фотоэлектрический ток. При попадании квантов света атомы фотокатода испускают электроны. Но один электрон на квант света – это очень мало, и тогда специалисты говорят, что у фотоэлемента мал квантовый выход. А что если фотоэлектроны ускорить электрическим полем и заставить ударяться о металлическую пластину – динод? Электрон выбьет из нее несколько новых электронов. Их также можно ускорить и направить к следующему диноду. В современном фотоумножителе может быть десяток динодов, а коэффициент умножения электронов достигает миллиона! В настоящее время фотоумножитель является самым чувствительным и эффективным приемником света.



Принцип действия иконоскопа

Посмотрите на упрощенный эскиз конструкции суперортикона. Изображение проецируется объективом на фотокатод, нанесенный изнутри на торцевую поверхность стеклянной трубки, откачанной до глубокого вакуума. Веществом фотокатода обычно служат соединения цезия, легко испускающие электроны под действием света. За фотокатодом расположены ускоряющий электрод и мишень с размещенной перед ней мелкой металлической сеткой. Фотоэлектроны ускоряются электрическим полем в сторону мишени, ударяются о нее и выбивают по нескольку вторичных электронов, которые тут же собираются сеткой. Чем ярче освещенность, тем больше фотоэлектронов бомбардирует мишень, тем больше она отдает вторичных электронов и тем больший положительный заряд получает. Так электронное изображение переносится с фотокатода на мишень. Чтобы оно не потеряло четкость в этой секции суперортикона, называемой секцией переноса, используется магнитное поле длинной фокусирующей катушки, надетой на трубку. Фокусируя электронный поток, оно заставляет фотоэлектроны, вылетевшие из какого-то места фотокатода, попадать на мишень в точке, лежащей точно напротив этого места.

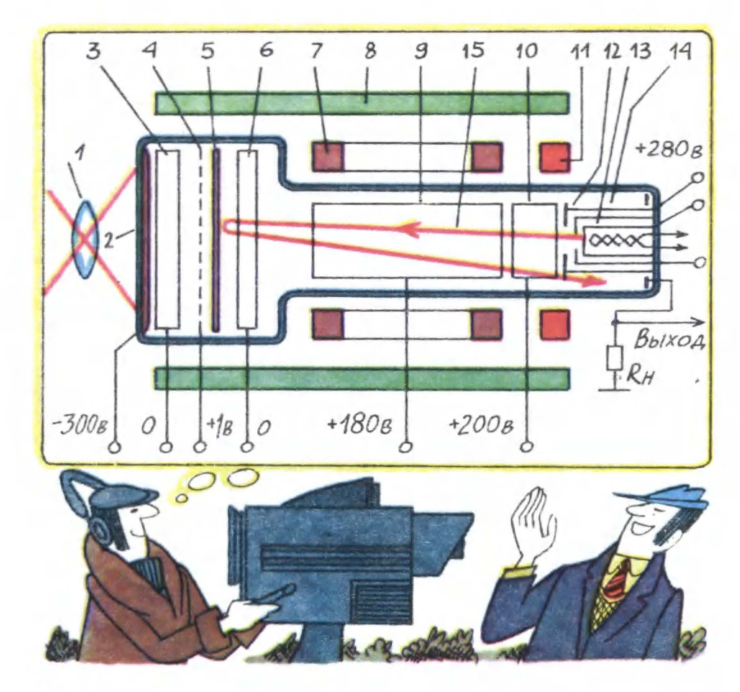
Итак, на мишени сформировалось распределение заряда, соответствующее исходному изображению. Мишень изготовлена из слабо проводящего электрический ток стекла, поэтому сформированный заряд передается и на противоположную сторону мишени. По ней движется (сканирует) электронный луч, считывая изображение. Для фокусировки и отклонения электронного луча служат уже упомянутая фокусирующая и отклоняющие катушки, расположен-

ные снаружи трубки. Поле фокусирующей катушки направлено по оси трубки. Оно не изменяет осевой составляющей скорости электрона. Но если у электрона «появится желание» полететь вбок, т. е. возникнет радиальная составляющая скорости. то сила Лоренца заставит его двигаться по спирали, возвращаясь к оси трубки. Дополнительная фокусировка осуществляется электрическим полем специального электрода. Поле отклоняющих катушек направлено перпендикулярно оси трубки. Оно отклоняет электронный луч по строкам и кадрам в соответствии с током пилообразной формы, подаваемым в катушки от генераторов разверток.

Перед мишенью установлен тормозящий электрод, создающий электрическое поле, уменьшающее скорость электронов в луче почти до нулевой. Такой «медленный» пучок электронов не вызывает вторичной эмиссии с мишени. Отраженный от мишени электронный луч возвращается в область «электронной пушки», вокруг которой расположены секции электронного умножителя. Здесь количество электронов увеличивается примерно в 1000 раз, и повышается чувствительность суперортикона к слабым сигналам. В результате чувствительность получается такой, что можно вести внестудийные передачи без дополнительного освещения. Наряду со множеством достоинств суперортикон имеет и существенный недостаток: уж



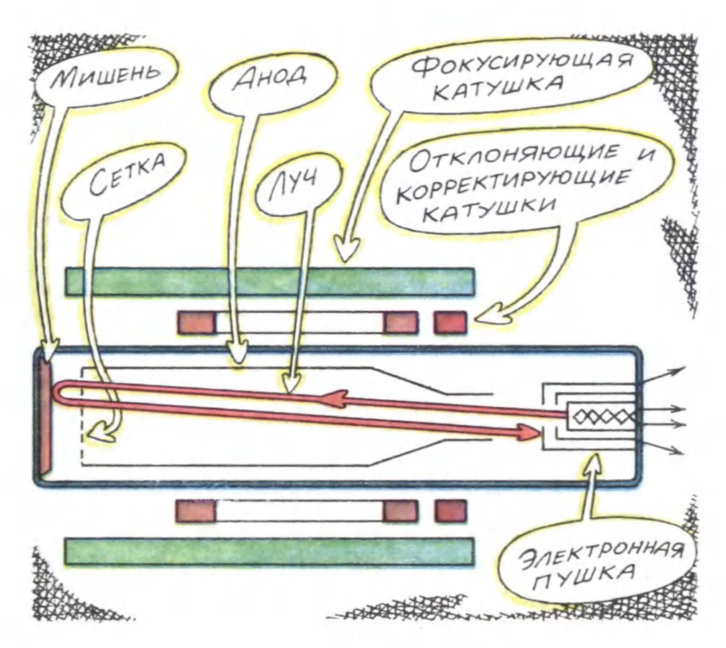
Фотоэлектронный умножитель



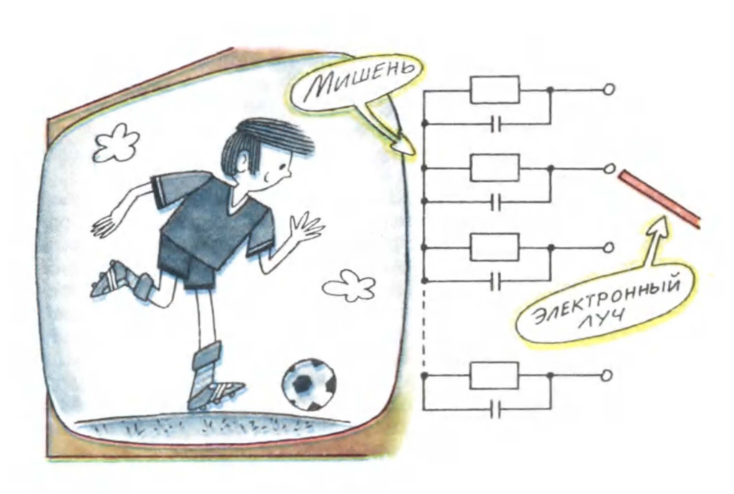
Устройство суперортикона:
1 – объектив; 2 – фотокатод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – сетка; 5 – мишень; 6 – тормозящий электрод; 7 – отклоняющие катушки; 8 – фокусирующая катушка; 9 – фокусирующий электрод; 10 – анод; 11 – корректирующие катушки; 12 – электронная пушка; 13 – катод; 14 – секция умножителя

очень он сложен по конструкции. Значительно проще устроен видикон.

В видиконе применена мишень из вещества, не испускающего фотоэлектроны, а изменяющего свою проводимость под действием света. К таким веществам относятся аморфный селен, сурьма, соединения свинца и кадмия. Как вы, вероятно, помните, селен использовался и в первой телевизионной системе Дж. Керри, но там не было коммутации элементов изображения – развертки. В видиконе изображение развертывается электронным лучом. Посмотрим устройство трубки. На внутреннюю торцевую ее поверхность нанесена полупрозрачная проводящая металлическая подложка, а поверх нее – слой вещества, образующего мишень. Перед мишенью расположена сетка, соединенная со вторым анодом и служащая для выравнивания поля в области мишени. С другой стороны трубки расположены «электронная пушка» (электронный прожектор) и анод, собирающий электроны, отраженные от мишени. Для фокусировки и отклонения луча на трубку надеты фокусирующая и отклоняющие катушки.



Устройство видикона



Принцип действия видикона

Работает видикон так. Сканирующий электронный луч, попадая на элементарные конденсаторы мишени (смотри эквивалентную схему), доводит потенциал правой обкладки до потенциала катода. Конденсаторы при этом заряжаются напряжением + 20 В, приложенным к полупрозрачной проводящей подложке мишени. Пока луч прочерчивает все строки кадра, каждая элементарная емкость разряжается через фотосопротивление.

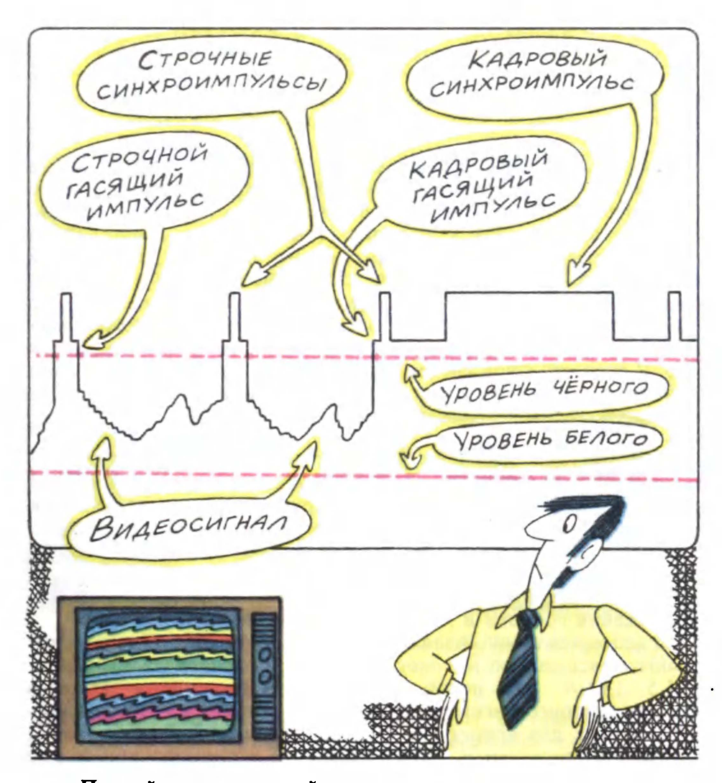
Если данный участок мишени освещен, то его сопротивление мало и конденсатор разряжается быстро. Когда электронный луч попадет на этот конденсатор, он создаст большой ток зарядки. Если же освещенность мала, конденсатор почти не разряжается, и от луча почти не требуется тока для его зарядки. Ток заряда элементарных конденсаторов, протекая через нагрузочный резистор, создает на нем видеосигнал.

Нам осталось выяснить, что же находится внутри передающей телевизионной камеры. Разумеется, оптическая система – объектив, а также передающая трубка с фокусирующей и отклоняющей системами, генераторы разверток. Кроме того, имеется предварительный видеоусилитель, повышающий уровень видеосигнала с 10...20 мВ, развиваемых передающей трубкой, до 0,1...0,3 В. Есть еще электронный видоискатель, попросту говоря, встроенный телевизор, показывающий оператору то, что попадает в кадр.

От телекамеры видеосигнал поступает в камерный канал, где содержатся усилители и корректоры телевизионного сигнала. На выходе каждого камерного канала имеются видеоконтрольные устройства, позволяющие режиссеру передачи «выбирать» нужную телекамеру. Далее к сигналу подмешиваются строчные и кадровые синхронизирующие импульсы, импульсы гашения луча во время обратного хода, образующие так называемую синхросмесь. Они создаются специальным синхрогенератором. Роль синхронизации в телевидении очень важна, ведь благодаря ей электронные лучи в передающей и во многих миллионах приемных трубок движутся строго одинаково. Если синхронизация нарушается, луч в приемной трубке – кинескопе – движется не так, как в передающей, и картинка искажается до неузнаваемости. Поэтому синхроимпульсы передаются в начале каждой строки и в начале каждого кадра. Они-то и запускают одновременно генераторы разверток и в передающей камере, и во множестве телевизоров, принимающих данную программу. После введения синхросмеси на выходе линейного усилителя формируется полный телевизионный сигнал, готовый для передачи в эфир. Он передается на телецентр, где модулирует радиопередатчик. Посмотрим, что происходит в телевизионном приемнике.

Принятый из эфира сигнал попадает в телевизионный приемник, усиливается, детектируется и выделяется в том виде, как он изображен на рисунке. Теперь он еще раз усиливается до амплитуды в несколько десятков вольт видеоусилителем и подается на управляющий электрод кинескопа, изменяя яркость свечения экрана. Одновременно из видеосигнала выделяются синхроимпульсы. Кадровый синхроимпульс имеет бóльшую длительность, и по этому признаку его можно отделить от строчных. Синхроимпульсы управляют работой двух генераторов разверток: строчной и кадровой, формирующих растр. Вот, собственно, и все. Лучи в передающей и приемной трубках движутся по растру одинаково, и перед телезрителем появляется точно такое же изображение, как и перед телевизионной камерой на студии.

Как все? «А звук?» – спросит недоумевающий читатель. Звук



Полный телевизионный сигнал

передается по совершенно отдельному каналу с помощью частотной модуляции. Если любой радиовещательный частотно-модулированный (ЧМ) приемник перестроить на частоты телевизионных каналов, можно слушать звуковое сопровождение телепередач. Правда, это не очень интересно, ведь, как справедливо уже было замечено, лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать.

Несколько слов о видеозаписи

Согласитесь, что очень удобно носить с собой в сумке с ремнем через плечо не кинокамеру, а легкую портативную телевизионную камеру, соединенную с легким портативным видеомагнитофоном, лежащим в той же сумке. Вы снимаете, точнее, записываете на магнитную ленту понравившийся сюжет, а затем дома, сидя в кресле, просматриваете запись на экране цветного телевизора. Не понравилась запись – можно стереть и записать что-нибудь другое. Такие портативные телекамеры уже созданы, но у нас пока еще они не получили широкого распространения. Стационарные видеомагнитофоны сейчас имеются в продаже, хотя цены на них пока еще очень

высоки. Да это и понятно: видеомагнитофон – достаточно сложный аппарат с трудоемкой в изготовлении прецизионной механической частью. Ведь полоса частот видеосигнала достигает 6 МГц, а при воспроизведении надо очень точно соблюсти временные соотношения в сигнале, чтобы не возникли геометрические искажения изображения.

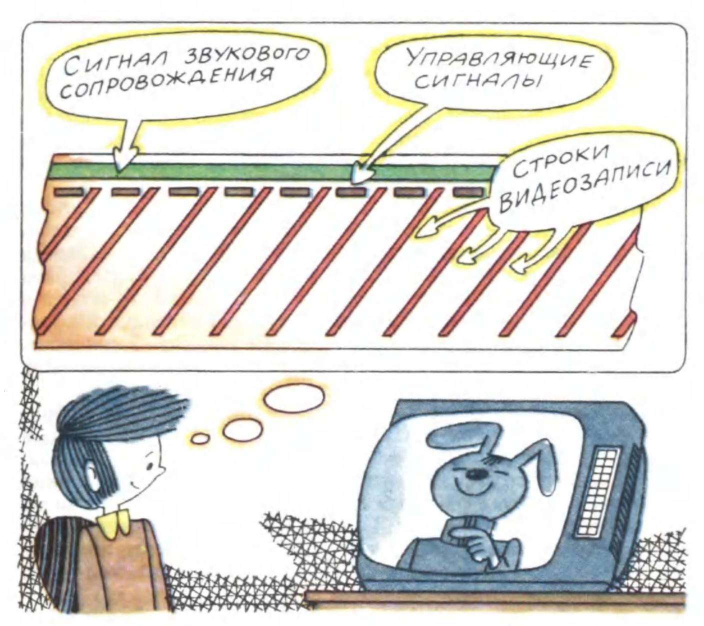
Непосредственно записывать на ленту широкополосный сигнал трудно, так как пришлось бы вводить слишком сильную коррекцию АЧХ усилителей записи и воспроизведения. Кроме того, нестабильность прилегания ленты к головке привела бы к амплитудной модуляции сигнала – мерцанию яркости изображения. Поэтому в видеомагнитофонах используют частотную модуляцию и записывают на ленту ЧМ колебания, модулированные видеосигналом. Это снимает проблемы, связанные с паразитной АМ, поскольку воспроизводимый ЧМ сигнал перед демодуляцией ограничивается по уровню. В отечественной системе видеозаписи минимальному уровню видеосигнала (уровню белого) соответствует мгновенная частота ЧМ сигнала 4,4 МГц, а максимальному (уровню синхроимпульсов) – 3 МГц.

Таким образом, девиация ЧМ сигнала составляет всего $\pm$ 0,7 МГц. Тем не менее ширина спектра ЧМ сигнала получается гораздо больше из-за широкого спектра модулирующих видеочастот и достигает 6...8 МГц. Сигналы цветности при цветной видеозаписи записываются отдельно от сигнала яркости с использованием поднесущих частот 0,594 МГц (красная строка) и 0,75 МГц (синяя строка). Для записи столь широкополосных сигналов относительная скорость движения головки и ленты должна быть очень высокой.

При непосредственной записи на ленту шириной 6,25 мм (ленту выбирают максимально высокого качества) скорость ее устанавливают 1,5...3 м/с. Это почти в 50 раз выше скорости ленты в звукозаписывающих магнитофонах. Запись ведется на трех дорожках, отведенных для яркостного и двух цветоразностных сигналов. При установке катушки с пленкой «другой стороной» три новые дорожки записываются на ленте в промежутках между тремя уже записанными. Ширина каждой из дорожек едва достигает 1 мм (при обычной стереозаписи звука на ширине ленты укладывается четыре звуковые дорожки). При прямой продольной видеозаписи полоса частот видеосигнала неизбежно сужается и качество изображения также несколько ухудшается.

Лучшие результаты дают видеомагнитофоны с блоком вращающихся головок. В них пленка шириной 12,7 или даже 25,4 мм. протягивается относительно медленно около цилиндрического блока с закрепленными на нем несколькими головками. Блок быстро вращается, причем ось вращения наклонена относительно пленки. В результате рабочие зазоры головок «прочерчивают» на поверхности ленты наклонные строки. При скорости вращения блока с двумя головками 1500 об./мин или 25 об./с на одной строке умещается как раз один кадр телевизионного изображения. Это позволяет осуществить при воспроизведении интересный трюк, так называемый стоп-кадр. Если протяжку ленты выключить, то магнитная головка на вращающемся блоке будет прочерчивать все время одну и ту же строку. Изображение на телевизионном экране как бы замрет и будет оставаться неподвижным, пока снова не включат протяжку ленты.

Мы не будем подробно рассматривать конструкцию видеомагнитофона – она достаточно сложна. На входе устройства записи в нем имеются блоки разделения цветного телевизионного сигнала на



Расположение дорожек на магнитной видеоленте

яркостную и цветоразностные компоненты, которые затем модулируют по частоте вспомогательные генераторы. Сформированный ЧМ сигнал поступает на магнитную головку. При воспроизведении все эти операции выполняются в обратном порядке. Кроме того, в видеомагнитофоне имеется масса вспомогательных устройств, предназначенных для синхронизации, коррекции начала строки развертки, регулирования скорости протяжки ленты и вращения блока головок, и т. п. Много усилий предпринимается конструкторами и для максимального упрощения управления видеомагнитофоном. Не редкость уже сенсорные переключатели режима работы, электронные дисплеи, показывающие уровень записи и воспроизведения, количество израсходованной ленты, и многое другое. По общей сложности видеомагнитофон приближается к небольшой ЭВМ, и уже поговаривают о микропроцессорном управлении режимами его работы.

Телевизионные передатчики

Когда передающая телевизионная студия сформирует полный телевизионный сигнал, его можно будет передать в эфир. Первые передачи электронного телевидения с высокой четкостью (625 строк разложения изображения) велись на метровых волнах УКВ диапазона. Выделенные каналы сохранились до настоящего времени. Это каналы I–V на частотах 48,5...100 МГц (6,2...3 м). По мере строительства телецентров во всех крупных городах этих каналов оказалось недостаточно, ведь расположенные рядом теле-

центры должны работать на разных каналах, иначе на границе областей обслуживания возможны сильные взаимные помехи. Например, если Москва ведет телевизионное вещание в канале I, то ни в Калинине, ни в Рязани, ни в любых других окрестных городах этот канал использовать нельзя, иначе слабый сигнал, приходящий из Москвы, будет создавать помеху. С высокой Останкинской башни телевизионный сигнал может распространятся при благоприятных условиях на расстояние до 300 км.

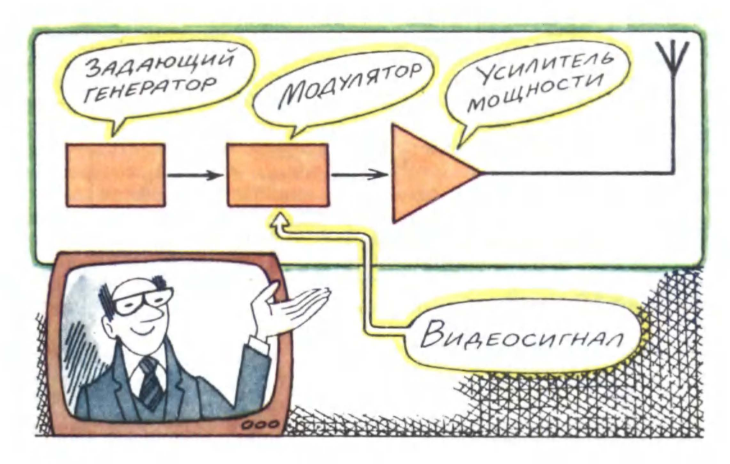
Выделили еще семь каналов в диапазоне частот 174...230 МГц (1,7...1,3 м). К настоящему времени и этого оказалось недостаточно, и к 12 каналам на метровых волнах добавили еще два десятка каналов на ДМВ в диапазоне 470...630 МГц (64...47 см). Чем выше частота канала, тем легче передать телевизионный сигнал с широкой полосой. Выше мы определили, что для передачи изображения, содержащего 625 строк и полмиллиона элементов изображения в кадре, нужен спектр частот шириной 6,5 МГц. Но при амплитудной модуляции несущей образуются две боковые полосы и ширина излучаемого спектра может достигнуть 13 МГц. Это слишком много, и специалисты сразу применили очень прогрессивный способ модуляции с подавлением одной боковой полосы. Правда, несущая не подавляется, а для детектирования в приемнике служит не синхронный, а самый обычный диодный детектор, как его часто называют,– детектор огибающей. Более того, для уменьшения искажений при детектировании нижняя боковая полоса частот подавляется не полностью, а оставляется ее часть шириной 1,25 МГц, непосредственно примыкающая к несущей.

Посмотрите на изображение спектра излучаемого телевизионного сигнала – там все это показано. На 6,5 МГц выше несущей сигнала изображения расположена несущая звукового передатчика. Звуковое сопровождение передается с частотной модуляцией при девиации $\pm$ 50 кГц. Полная ширина радиочастотного спектра телевизионного сигнала получается около 8 МГц.

При передаче столь широкого спектра на метровых волнах мы получаем относительную ширину спектра около 10%, а на частотах первых телевизионных каналов – даже больше. Это создает определенные трудности в проектировании и передатчиков, и антенн, и приемников: все эти устройства должны быть широкополосными. Любая неравномерность в передаче телевизионного спектра приводит к ухудшению качества и четкости изображения. На ДМВ относительная ширина полосы частот намного уже и пропустить ее



Спектр видеосигнала

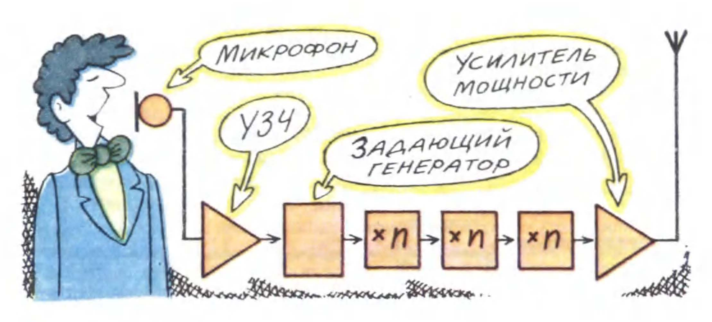


Передатчик изображения

без ослаблений легче. Поэтому и качество телевизионного вещания на ДМВ обычно выше.

Структурная схема телевизионного передатчика несложна. Несущая генерируется высокостабильным задающим генератором. В модуляторе амплитуда несущей изменяется в такт с видеосигналом, поступающим от телекамеры. Ну а перед антенной установлен усилитель мощности, увеличивающий мощность телевизионного сигнала до нескольких десятков, а иногда и сотен киловатт. Впрочем, ввиду ограниченного радиуса действия УКВ передатчиков особенно большие мощности не нужны. Канал звукового сопровождения представляет собой отдельный передатчик меньшей мощности. Лишь в некоторых случаях используют общий усилитель мощности звукового и видеосигналов, который в этом случае должен иметь особенно высокую линейность. Линейность усилителя – это прямо пропорциональная зависимость между амплитудами входного и выходного сигналов. Любая нелинейность приводит к тому, что в спектре выходного сигнала появляются побочные продукты – сигналы с частотами, которых во входном спектре не было. Так, например, если во входном спектре присутствовали две частоты – f_1 и f_2, то в выходном спектре появятся еще и частоты $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$. Это расширит спектр излучения, создаст помехи и ухудшит качество сигнала.

Еще несколько слов о передатчике звукового сопровождения. Частота его задающего генератора слегка изменяется под действием звукового сигнала. На структурной схеме нарисованы несколько умножителей частоты. Зачем они? Вот зачем. Гораздо удобнее выполнить задающий генератор на сравнительно низкую частоту – в несколько раз ниже излучаемой. Генератор будет работать стабильнее, и не будут влиять наводки мощного сигнала со стороны выходного каскада. Более того, при умножении частоты возрастает и девиация частоты, вызываемая звуковым модулирующим сигналом. Поясним сказанное примером. Звуковое сопровождение первого телевизионного канала передается на частоте 56,25 МГц. Сконструируем задающий генератор на частоту 6,25 МГц и промодули-



Передатчик звука

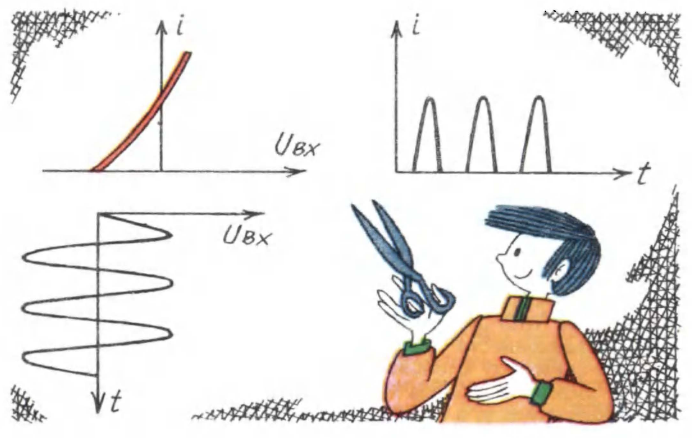
руем его звуковым сигналом с девиацией всего $\pm$ 5,55 кГц. Затем включим последовательно два утроителя частоты, чтобы получить общий коэффициент умножения в девять раз. В результате на выходной каскад поступит ЧМ сигнал с требуемыми центральной частотой 56,25 МГц и девиацией $\pm$ 50 кГц.

Как умножают частоту? Давайте уж не будем подробно разбираться в технических деталях, установим только общий принцип. Если форму синусоидального сигнала сильно исказить, то кроме основной частоты f_0 он будет содержать массу гармоник, т.е. колебания с частотами $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ и т.д. Остается выделить нужную гармонику колебательным контуром. А уж исказить форму колебаний очень просто (ломать – не делать!): достаточно выбрать режим обычного усилительного каскада на нелинейной части его характеристики. Если, например, увеличить напряжение смещения, то каскад будет работать «с отсечкой», т.е. усиливать только во время части периода входного сигнала. А остроконечные импульсы тока, протекающего в нагрузке, очень богаты гармониками. Вот вам еще несколько преимуществ частотной модуляции: модулировать сигнал можно в маломощном задающем генераторе, а нелинейные искажения, вносимые последующими каскадами, на качество сигнала не влияют.

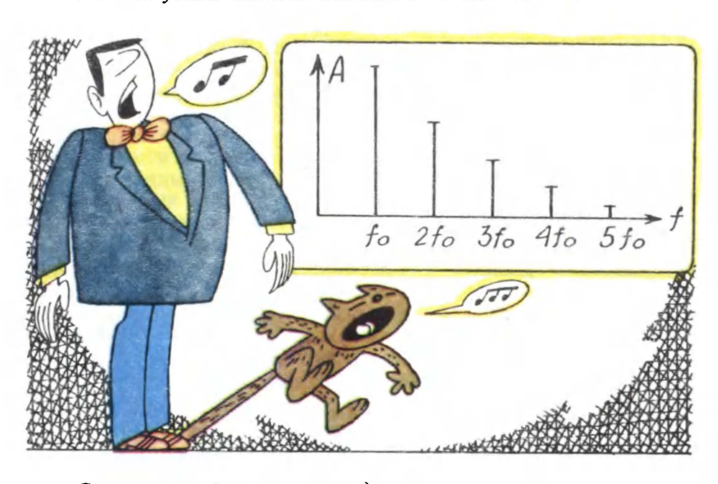
Особо хотелось рассказать об антеннах передающих телецентров. Зачем строят высокие башни, вроде Останкинской в Москве? Вы уже знаете, что ультракороткие волны распространяются прямолинейно и с высокой башни «дальше видно» – расширяется радиус уверенного приема данного телецентра. Но даже с высокой башни нет никакого смысла излучать сигнал во все стороны. Разумеется, я не имею в виду, что надо излучать на север и не излучать на юг. Совсем нет! В горизонтальной плоскости надо излучать равномерно по всем направлениям. А вот вверх излучать сигнал незачем. И вниз, в землю, тоже. Основную часть мощности сигнала надо посылать вдоль горизонта, где и расположена основная масса, если не сказать, все телезрители со своими приемными антеннами.

Сформировать узкую диаграмму направленности передающей антенны в направлении горизонта можно. Для этого надо расположить по вертикали одну над другой несколько всенаправленных антенн. Питать антенны следует от общего передатчика через фидеры равной длины. При этом все антенны будут возбуждаться в одной и той же фазе. Посмотрим, как формируется диаграмма направленности.

В направлении горизонта расстояния от каждой из передающих антенн до приемника одинаковы, и все волны приходят в одной и той же фазе. Следовательно, электромагнитные поля складываются в этом направлении. Возьмем другое направление, скажем под углом α вверх. Тогда путь волны от верхней антенны до удаленного наблюдателя будет меньше на $\Delta = h \sin \alpha$, чем от нижней. Здесь h – расстояние между антеннами. Если Δ окажется равным половине длины волны, то колебания взаимно скомпенсируются и излучения в этом направлении не будет. Мы рассмотрели две антенны. Не будем рассматривать N антенн (это сложно, но вполне возможно), а сформулируем вывод: решетка синфазных антенн, расположенных вертикально, излучает преимущественно в горизонтальном направлении, причем ширина главного лепестка диаграммы направлен-



Работа усилительного каскада с «отсечкой» тока



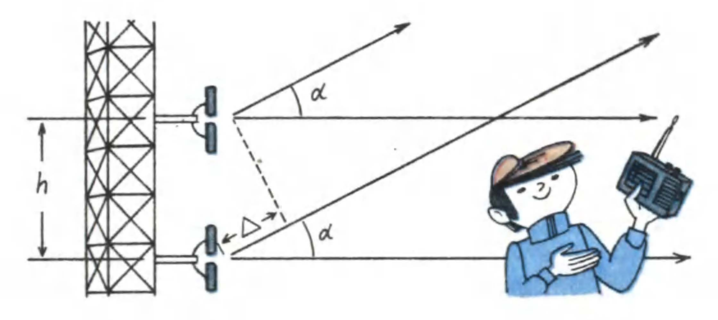
Спектральный состав выходных импульсов



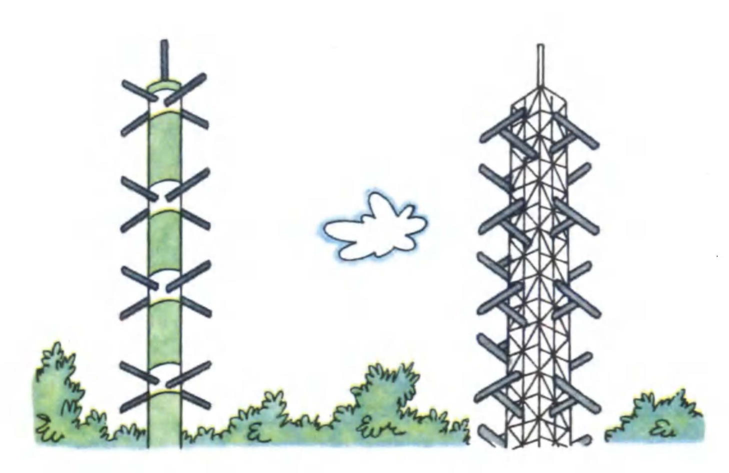
Диаграмма направленности передающей телевизионной антенны

ности, выраженная в радианах, примерно равна отношению λ/H, где λ – длина волны, а H – высота решетки из антенн. Таким образом, на высокой мачте можно разместить достаточно большую антенную решетку и сильно сузить луч в направлении горизонта. Не правда ли, нарисованная на этой странице передающая антенна со своей диаграммой направленности очень напоминает маяк, освещающий узким лучом горизонт? В обоих случаях происходит концентрация излучаемой энергии в нужном направлении.

Отдельные антенны в решетке излучателей располагают достаточно часто, на расстоянии 0,5...0,7 длины волны. Если антенны расположить реже, то в диаграмме направленности появятся дополнительные, побочные максимумы, направленные под большим углом к горизонту и, следовательно, ненужные. Каждый из излучателей должен быть всенаправленным в горизонтальной плоскости. Такими свойствами обладает кольцевой излучатель, или «турникет», составленный из двух скрещенных диполей. На сравнительно толс-



Формирование диаграммы направленности



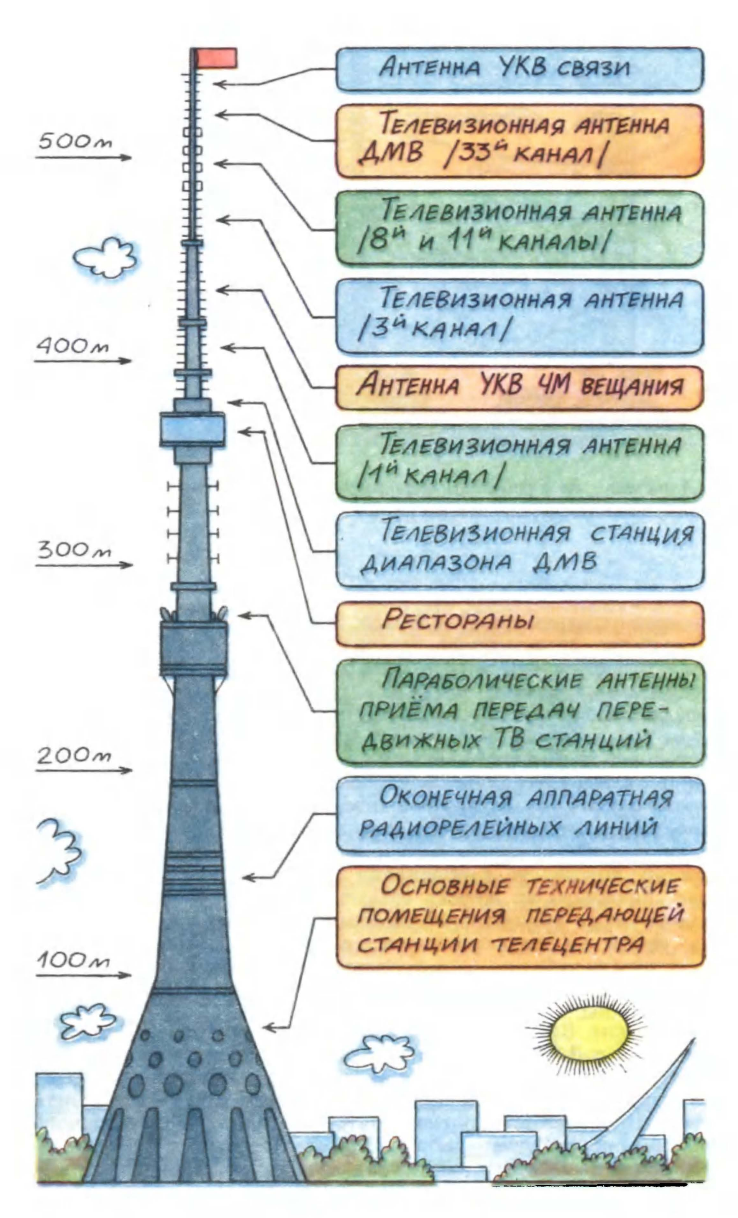
Антенна в виде решетки турникетных излучателей и кольцевые излучатели, составленные из четырех диполей

тых мачтах часто устанавливают кольцевой излучатель, состоящий из четырех отдельных полуволновых диполей.

Хозяйство современного телевизионного центра огромно, и высокая телевизионная башня – лишь его составная часть. На верхней части башни располагаются решетки антенн – своя для каждого из передаваемых каналов. Ниже, обычно на той же башне, расположен зал передатчиков. Это делают для того, чтобы были короче фидерные линии от передатчиков к антеннам, ведь потери в фидере пропорциональны его длине. Еще опаснее рассогласование длинной фидерной линии с передатчиком и антенной. При этом часть сигнала отражается от антенны в линию, возвращается к передатчику, снова переотражается к антенне и, будучи излученной в эфир с некоторой задержкой, создает на изображении повторные контуры. Кстати сказать, подобный же эффект создает и рассогласование фидера, проведенного от коллективной антенны к вашему телевизору. Поэтому, увидев на экране двоящееся и троящееся изображение, не спешите ругать качество самого телевизора – возможно, все дело в неисправности фидерных линий и разветвительных коробок коллективной антенны.

Телебашня Всесоюзного телевизионного центра в Останкине представляет собой уникальное сооружение. Ее основание выполнено из армированного железобетона, а верхняя часть представляет собой конструкцию из металлических решетчатых ферм. Башня рассчитана так, чтобы противостоять порывам даже ураганного ветра, очень редко случающегося в Москве. Прочности железобетона для этого было бы недостаточно, ведь бетон хорошо противостоит только сжатию, а не растяжению. Для повышения прочности в стенках башни имеются вертикальные каналы, в которых расположены сильно натянутые металлические тросы. Натяжение тросов постоянно контролируется, кроме того, когда дует ветер, тросы с наветренной стороны башни натягивают сильнее с помощью специальных лебедок.

Из-за теплового расширения высота телебашни не остается



Телебашня в Останкине

постоянной. Летом она увеличивается на четверть метра, а зимой – уменьшается. Даже в течение суток одна сторона башни, нагреваемая солнцем, расширяется больше другой и вершина башни отклоняется, как бы пытаясь уйти от палящих солнечных лучей. Дополнительные колебания с амплитудой до нескольких метров вершина башни совершает под действием порывов ветра.

Данные о высоте башни, приводимые в различных источниках, весьма разноречивы. Отчасти это объясняется тем, что вершина башни недавно перестраивалась в связи с установкой антенн 33-го канала телевидения диапазона ДМВ. Точные измерения координат вершины башни периодически производятся геодезическими приборами. Сегодня специалисты могут с точностью до миллиметра сообщить высоту телебашни: она составляет 540 м 74 мм при температуре + 20 °C.

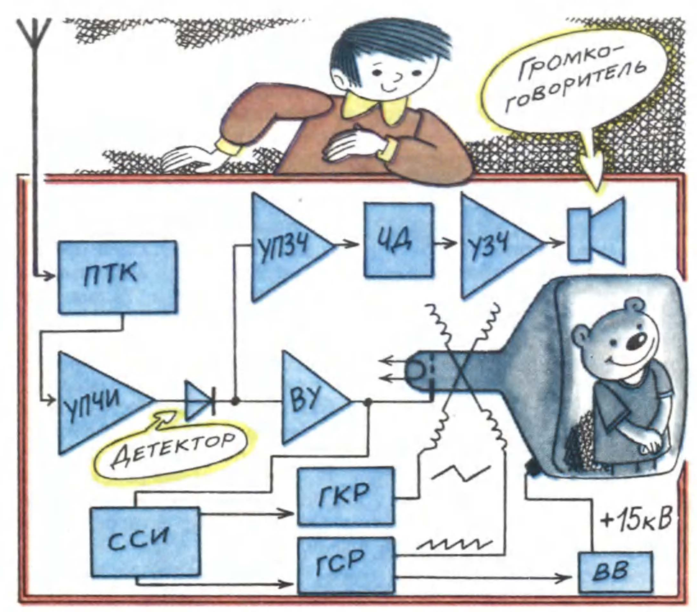
Отдельно от передатчиков и телебашни с антеннами расположено здание собственно телецентра со множеством студий, дикторских, просмотровых залов, аппаратных и тому подобных помещений. Телецентры оснащены мощной аппаратурой и для внестудийных передач. Видеосигнал со стадиона, из театра или просто с телекамеры, ведущей уличный репортаж, передается по кабелю или через маломощный СВЧ передатчик на телецентр. Непосредственные передачи в эфир ведутся нечасто. Обычно передачу сначала записывают на видеомагнитофон, а потом воспроизводят и передают в эфир в удобное для телезрителей время.

Как устроен телевизор?

Не пора ли нам перейти к тому, что к нам ближе, а именно к нашем домашнему телевизору? В его «нутро» вам, вероятно, приходилось заглядывать. Множество деталей, соединительных проводов... Как же во всем этом разобраться? Поможет структурная схема, тем более что принципы передачи изображений нам в основном ясны. Давайте в ней разберемся.

Прежде всего необходимо принять сигнал. Чаще всего для этого служит коллективная телевизионная антенна, от которой проведен кабель и к вашему телевизору. Телевизионных антенн разработано великое множество, но основным типом остается знакомый нам полуволновый диполь-вибратор. Для того чтобы он лучше принимал сигнал от телецентра и ослаблял приходящие помехи, рядом с вибратором устанавливают другие, пассивные вибраторы, формирующие желаемую диаграмму направленности.

Первый блок на структурной схеме – ПТК, или переключатель телевизионных каналов (здесь будут использоваться сокращения, привычные для литературы по телевидению). В ПТК входит усилитель радиочастоты, смеситель и гетеродин – элементы, имеющиеся в каждом супергетеродинном приемнике. На каждый канал имеется набор катушек, все они закреплены на общем барабане. Поворачивая барабан ручкой переключения каналов, мы можем включать определенный комплект катушек, соответствующий выбранному каналу. Переключатель телевизионных каналов с барабанными переключателями теперь используется все реже. Им на смену пришли ПТК с электронной настройкой, малогабаритные и более надежные. Для перестройки резонансной частоты контуров в них установлены специальные полупроводниковые диоды – варикапы. На варикап подается запирающее напряжение смещения, при этом *p-n* переход не



Структурная схема телевизионного приемника

пропускает электрический ток. Но его емкость изменяется при изменениях напряжения смещения. Необходимое для настройки на каждый канал напряжение устанавливается заранее с помощью потенциометров, а включение канала производится нажатием кнопки или сенсорного контакта. Согласитесь, что такой способ настройки гораздо удобнее. После преобразования часто́ты сигнала приводятся к единой для всех каналов полосе. Промежуточная частота несущей изображения по существующему стандарту равна 38 МГц, звука – 31,5 МГц. Но как же так, ведь в любом канале частота звуковой несущей выше частоты несущей изображения? Все просто: гетеродин ПТК настраивается выше частоты канала и проходит инверсия спектра. Для первого канала, например, частота гетеродина равна 87,75 МГц. Вычитая из этого значения 49,75 МГц (частота видеонесущей), получаем 38 МГц, а вычитая 56,25 МГц (частота звуковой несущей), получаем 31,5 МГц.

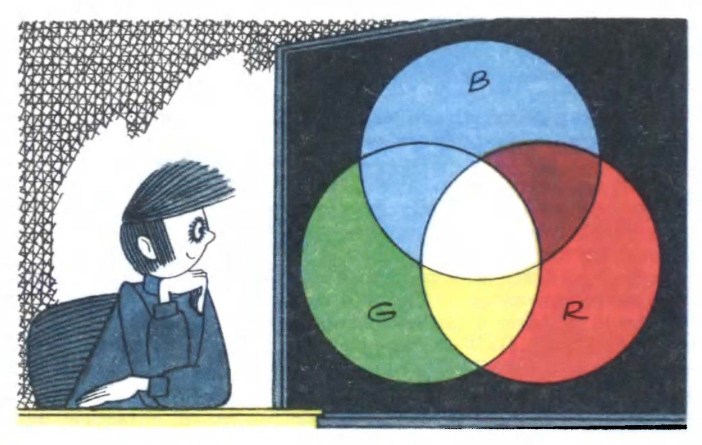
Далее следует УПЧИ – усилитель промежуточной частоты изображения. Раньше он содержал три-четыре ламповых каскада усиления, а теперь – несколько транзисторных каскадов. Между каскадами установлены колебательные контуры и фильтры, выделяющие только нужный спектр частот. Они определяют селективность приемника. Усиленный сигнал подается на детектор, а продетектированный видеосигнал через видеоусилитель – на управляющий электрод кинескопа. Там видеосигнал управляет током луча, а следовательно, и яркостью элементов изображения в соответствии с передаваемым сюжетом. А как же звук? Отдельного усилителя сигнала с частотой 31,5 МГц нет – он хорошо усиливается в УПЧИ и попадает на детектор вместе с видеонесущей. Между несущими звука и изображе-

ния возникают биения. Их частота равна разности частот несущих, т.е. 6,5 МГц. Сигнал с этой частотой и выделяется после видеодетектора и дополнительно усиливается в УПЧЗ – усилителе промежуточной частоты звука. Сигнал ПЧЗ промодулирован по амплитуде видеосигналом и по частоте звуковым сопровождением. Амплитудную модуляцию можно снять ограничителем. Да к тому же и частотный детектор (ЧД) ее хорошо подавляет. В результате на выходе ЧД выделяется звуковой сигнал, подаваемый через усилитель звуковой частоты (УЗЧ) на громкоговоритель. Описанный тракт приема получается проще, чем тракт с отдельными приемниками сигналов звука и изображения.

Следующий блок, подключенный к выходу видеоусилителя, – селектор синхроимпульсов (ССИ). Он отделяет синхроимпульсы от видеосигнала и подает их на генератор кадровой развертки (ГКР) и строчной развертки (ГСР). Генераторы вырабатывают ток пилообразной формы, питающий отклоняющие катушки, для получения растра на экране кинескопа. Этот процесс нам уже знаком. Последний элемент структурной схемы – высоковольтный выпрямитель (ВВ), питающий кинескоп высоким напряжением, ускоряющим электроны. Выпрямитель присоединен к генератору строчной развертки, и вот почему. Было бы очень сложно делать сетевой выпрямитель на напряжение в десятки киловольт. Но по счастью, у нас уже есть генератор строчной развертки, вырабатывающий ток с частотой 15625 Гц. Это довольно высокая частота, следовательно, период колебаний тока мал: всего 64 мкс. Но еще меньше время обратного хода луча, т.е. время, за которое пилообразный ток изменяется от максимального значения до минимального. Оно составляет, согласно телевизионным стандартам, не более 12 мкс. Строчные катушки обладают некоторой индуктивностью, да и подключены они к генератору развертки через трансформатор (так называемый строчник), также обладающий индуктивностью. А когда в индуктивной цепи резко изменяется ток (вспомните катушку Румкорфа), возникает большая ЭДС самоиндукции. Поэтому при работе генератора строчной развертки на его трансформаторе возникают импульсы напряжения амплитудой в несколько киловольт. Так это же то, что нужно! Остается выпрямить их и подать на анод кинескопа. Тем более, что потребляемый кинескопом ток очень невелик: не более нескольких миллиампер. Так устроено питание кинескопа во всех современных телевизорах. Если вышел из строя генератор кадровой развертки, на экране видна одна горизонтальная ярко светящаяся линия: все строки сливаются в одну. Если же отказал генератор строчной развертки, на экране ничего не видно: вместе со строчной разверткой прекратилось и питание кинескопа высоким напряжением. Вот мы и рассмотрели устройство телевизора. «Но как же цвет?» – спросите вы. Да, мы рассматривали черно-белый телевизор. Их сейчас выпускают все меньше и меньше, а черно-белые телепередачи уже почти не ведутся. Наступила эра цветного телевидения. О нем мы сейчас и побеседуем.

Как раскрасить изображение?

Проще всего это было сделать лет 25 назад. Тогда продавалась цветная пленка, накладываемая на экран черно-белого телевизора. Сверху она была голубой (небо), снизу зеленой (трава), а в середине ... я уже забыл, какой она была в середине! Поскольку такой вариант цветопередачи не устраивал ни телезрителей, ни



Смешение цветов

уважающих себя инженеров, пленка из продажи быстро исчезла, а специалисты разработали модели цветных телевизоров. Как же передают цвет? И сколько цветов надо передавать? Оказывается, основных цветов всего три: красный, зеленый и синий. В телевидении их обозначают начальными буквами соответствующих английских слов: *R* (red), *G* (green), *B* (blue). Любой другой цвет можно получить комбинацией этих трех. Желтый, например, получается при смешении красного и зеленого. Таким приемом широко пользуются художники, смешивая на палитре краски.

Итак, на первый взгляд самая простая и очевидная система цветного телевидения должна предусматривать передачу одновременно трех изображений: красного, зеленого и синего. Исходное цветное изображение через соответствующие светофильтры проецируются одновременно на три передающие трубки, а на приемной стороне изображение с экранов трех кинескопов: красного, зеленого и синего – проецируется на общий экран. Нет таких кинескопов? Ничего страшного – подходят обычные, белые, со светофильтрами,

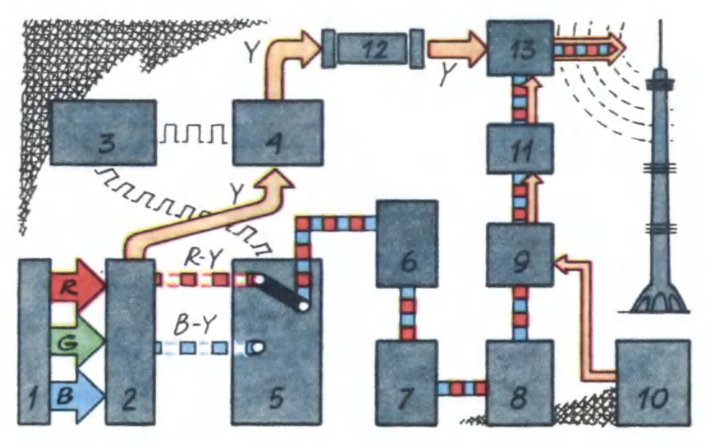


Система с последовательной передачей цветов

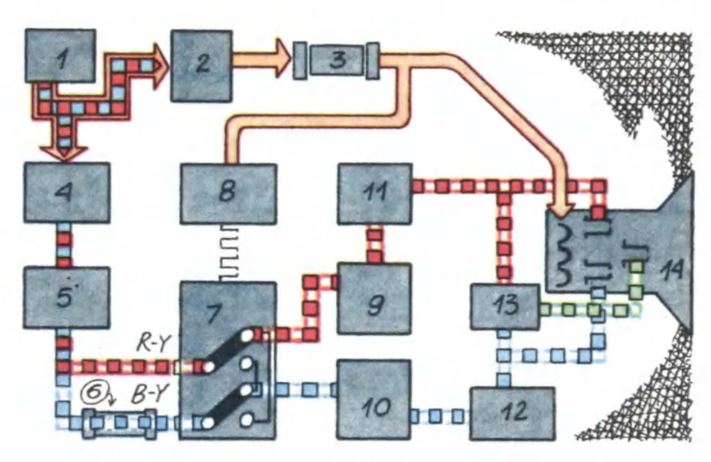
наложенными на экран. Беда в другом – нужны три канала передачи. Неужели для передачи одной цветной программы занимать три телевизионных канала? Слишком расточительно. Телевизор получается сложным и дорогим, как киноустановка, поскольку изображение надо проецировать на киноэкран, да и три кинескопа стоят недешево. Воспользуемся опять принципом кино и будем передавать красное, зеленое и голубое изображения поочередно, решили инженеры. Такая система цветного телевидения была разработана и даже испытывалась в 50-х годах. Перед телекамерой и перед экраном черно-белого кинескопа устанавливали вращающиеся диски с прозрачными цветными секторами – светофильтрами. Произошел как бы возврат к механическому телевидению, но уже на основе электронного! Диски вращались синхронно, и для стабилизации их вращения служила специальная система. А частоту кадровой и строчной разверток пришлось утроить, чтобы в течение 1/25 с (время передачи одного кадра в черно-белом телевидении) передать три изображения. Результаты получились неплохие, и несколько опытных цветных телевизоров работало в Москве. Но опять беда: подавляющее большинство телезрителей – владельцев черно-белых телевизоров смотреть эти передачи не могли. Смотреть-то, конечно, могли, и автор сам это делал, но на экране воспроизводилось сразу девять одинаковых картинок! Так получилось потому, что при цветной передаче частота развертки изображения была втрое выше. Поскольку картинки получались мелкими, смотреть их не доставляло никакого удовольствия. Говоря техническим языком, предложенная система цветного телевидения не обладала совместимостью с черно-белой системой. Были и другие недостатки: быстро вращающийся диск шумел, электризовался от трения о воздух и, притягивая мелкие пылинки, скоро становился пыльным до непрозрачности. Во всем мире начались поиски и разработки новых, совместимых систем цветного телевидения.

Таких систем сейчас используется три: NTSC (НТСЦ) – в США, Канаде, Японии, Республике Куба и ряде стран Центральной и Южной Америки; PAL (ПАЛ) – в ФРГ, Великобритании и ряде стран Западной Европы, Азии и Африки; SECAM (СЕКАМ) – в ряде стран Европы (в том числе СССР), Азии и Африки. Системы во многом схожи и различаются лишь деталями формирования так называемых сигналов цветности. Остановимся подробнее на системе SECAM. Она полностью совместима, т. е. цветная телепередача принимается черно-белым телевизионным приемником как черно-белая, а черно-белую передачу можно смотреть и с помощью цветного телевизора, но, разумеется, без цвета. Сейчас практически все телепередачи ведутся в цветном изображении.

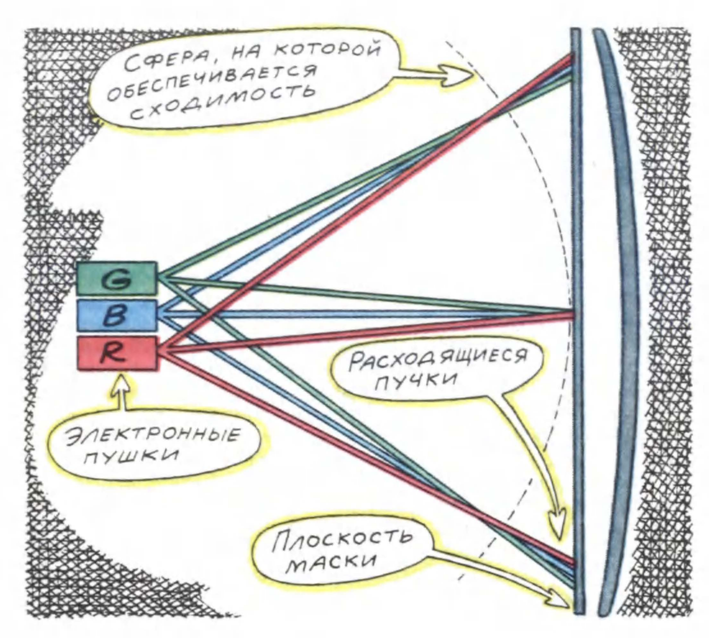
В системе SECAM сигналы, соответствующие трем основным цветам изображения, не передаются. Вместо этого передаются их комбинации, прежде всего так называемый яркостный сигнал E_Y. Он является суммой цветовых сигналов красного E_R, зеленого E_G и синего E_B, причем суммирование производится с учетом кажущейся различной яркости цветных изображений. В результате яркостный сигнал создает на экране телевизора обычное черно-белое изображение. Яркостный сигнал передается в полосе частот 6 МГц точно так же, как и обычный видеосигнал в черно-белом телевидении. Для передачи цвета формируют цветоразностные сигналы $E_{R\text{-}Y}$, $E_{G\text{-}Y}$ и $E_{B\text{-}Y}$ (на рисунке, для простоты, они обозначены $R\text{-}Y, G\text{-}Y, B\text{-}Y$). Они несут информацию только о цвете передаваемого изображения. Передавать все четыре сигнала (яркости и три цветоразностных) нет необходимости, поскольку третий сигнал цветности $E_{G\text{-}Y}$ можно



Система цветного телевидения SECAM *(передающая часть): 1 – телекамера; 2 – матрица; 3 – синхронизатор; 4 – смеситель яркостного и синхронизирующих сигналов; 5 – электронный коммутатор; 6 – фильтр нижних частот; 7 – блок предыскажений; 8 – ограничитель; 9 – частотный модулятор; 10 – генератор цветовой поднесущей; 11 – фильтр; 12 – линия задержки; 13 – смеситель*



Система цветного телевидения SECAM *(приемная часть): 1 – приемник; 2 – фильтр сигнала; 3 – линия задержки; 4 – фильтр цветоразностных сигналов; 5 – фильтр R-Y и B-Y; 6 – линия задержки; 7 – электронный коммутатор; 8 – амплитудный селектор; 9 – частотный детектор сигнала R-Y; 10 – частотный детектор сигнала B-Y; 11, 12 – корректирующий блок; 13 – матрица; 14 – кинескоп*



Устройство цветного кинескопа

сформировать в телевизоре из сигналов E_{R-Y} и E_{B-Y}. Это делается в так называемом матричном устройстве, в котором в определенной пропорции складываются принятые сигналы E_{R-Y} и E_{B-Y}. В результате получается сигнал $-E_{G-Y}$, у которого остается лишь инвертировать полярность, чтобы получить третий цветоразностный сигнал E_{G-Y}. Затем из имеющихся трех сигналов вычитается яркостный сигнал E_Y и образуются исходные цветовые сигналы E_R, E_G и E_B. Они и подаются на управляющие электроды кинескопа.

Матричное устройство можно выполнить на резисторах, операционных усилителях или специальных микросхемах. В ряде моделей телевизоров матрицирование осуществляют в самом кинескопе, подавая три цветоразностных сигнала на управляющие электроды трех электронных «прожекторов» кинескопа, а яркостный сигнал – на его общий катод. При этом повышение потенциала управляющих электродов увеличивает ток лучей, а повышение потенциала катода – уменьшает. Соответственно изменяется и яркость свечения экрана. Это как раз и соответствует «вычитанию» яркостного сигнала.

Таким образом, необходимо передавать кроме яркостного лишь два сигнала цветности. Любопытно, что для их передачи используется та же самая полоса частот, что и для сигнала яркости, и полная полоса цветного телевизионного сигнала получается не шире, чем черно-белого. Вот как это делается.

Давно замечено, что восприимчивость человеческого глаза к окраске деталей изображения зависит от размеров этих деталей. С их уменьшением восприимчивость цвета резко падает, и мелкие детали цветного изображения воспринимаются как черно-белые.

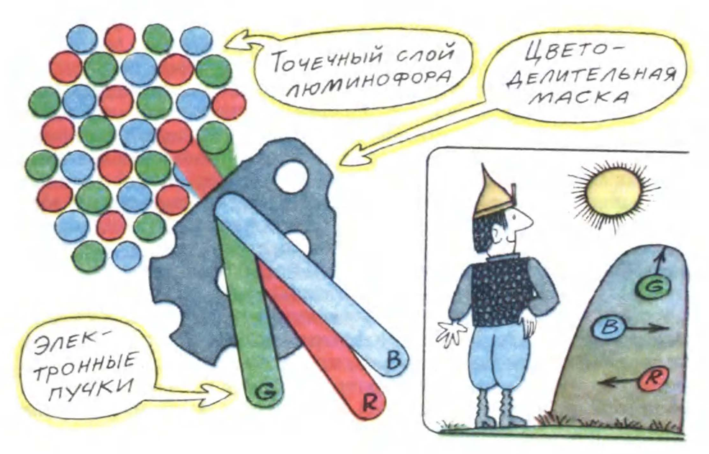
Следовательно, с высокой четкостью необходимо передавать лишь черно-белую структуру изображения, которой соответствует яркостный канал. Цветоразностные каналы высокой четкости не требуют, поэтому они могут занимать гораздо более узкую полосу частот. Ведь, как мы помним, чем выше четкость изображения, т.е. чем на большее число элементов разбивается изображение, тем шире требуемая полоса частот для передачи изображения. В системе SECAM полоса частот, в которой передаются сигналы цветности, не превосходит 1...1,5 МГц, что в 4 раза меньше полосы частот канала яркости (6 МГц). Сигналы цветности передаются на вспомогательных цветовых поднесущих 4,25 и 4,406 МГц. Цветовые поднесущие оказываются в спектре видеосигнала яркости. Не мешает ли это смотреть передачу? Оказывается, не мешает. Когда луч развертывает строку, его яркость изменяется в небольших пределах с частотой цветовой поднесущей. В результате строка становится как бы пунктирной – яркие участки на ней чередуются с темными. Но поскольку структура этих участков мелкая, то глаз ее не замечает, точно так же, как он не замечает строчную структуру растра, если, конечно, не сидеть слишком близко к экрану.

Цветовые поднесущие модулируются сигналами цветности по частоте, причем девиация выбирается не слишком большой: не более 0,5 МГц. Таким образом, весь спектр сигналов цветности занимает лишь верхнюю часть спектра сигнала яркости. Кстати, догадайтесь теперь, как, глядя на экран черно-белого телевизора, определить, идет ли цветная передача? Догадались? Очень просто: структура изображения при близком рассмотрении его оказывается точечной – это «работают» цветовые поднесущие, модулируя яркость луча.

Итак, в цветном телевизоре нужен новый блок – блок цветности. В этом блоке выделяются цветовые поднесущие, детектируются, а из продетектированных сигналов получаются с помощью матричной схемы сигналы цветности E_R, E_G и E_B. Внимательный читатель может задать вопрос: «Не мешают ли две цветовые поднесущие друг другу, ведь их частоты расположены близко и между ними могут возникнуть биения?». Это действительно может быть, но проблему решили просто. Сигналы цветности передают через строку: в течение одной строки – сигнал E_{R-Y}, а в течение другой – E_{B-Y}. Это вполне оправдано, ведь четкость цветовой картинки невысока. Для компенсации запаздывания цветоразностного сигнала вводят специальную линию задержки на время, равное времени передачи одной строки – 64 мкс. Существует еще одна проблема. Время задержки сигнала в цепях телевизионного приемника, как впрочем и любого другого устройства, обратно пропорционально полосе пропускания. Следовательно, широкополосный сигнал яркостного канала проходит через цепи приемника быстрее, чем сравнительно узкополосные сигналы яркости. Если задержку сигналов яркости не скомпенсировать, то на экране цветного телевизора можно увидеть довольно любопытные эпизоды.

Например, ярко-рыжий лев прыгнул из одного угла экрана в другой, но прыгнул черно-белым, а его ярко-рыжая шевелюра прыгнула вслед за ним с некоторым опозданием! Я немного утрирую, но «смазывание» цветов на движущемся изображении будет заметным. Для компенсации этого явления в канал яркости цветного телевизора вводят еще одну линию задержки. Тем не менее «смазывание» цветов на быстро движущихся изображениях иногда все-таки бывает заметно.

Ну вот, мы и рассмотрели отличия в структурной схеме цветного телевизора. Сейчас самое главное – устройство цветного кинеско-



Масочный кинескоп

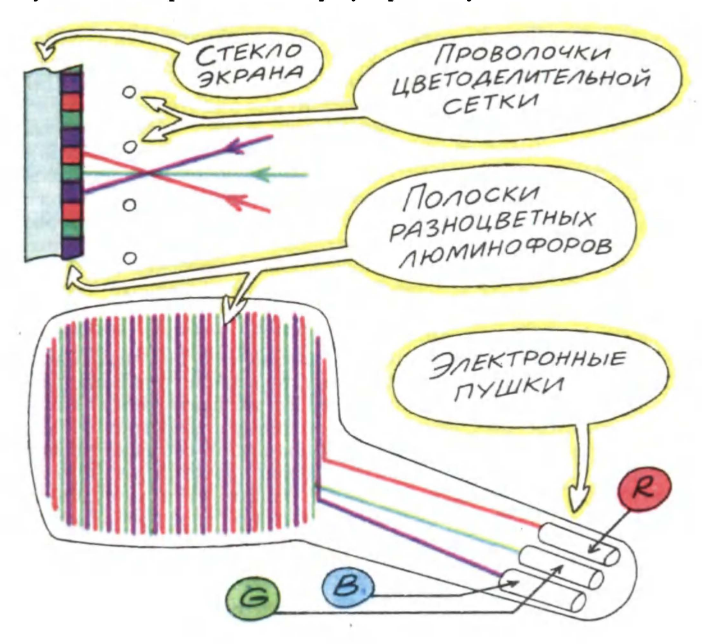
па, поскольку именно он окончательно формирует цветное изображение. Цветные кинескопы в их современном виде появились после того, как были разработаны люминофоры, светящиеся под ударами электронов красным, синим и зеленым цветами. Цветной кинескоп имеет три катода и соответственно три электронных прожектора. Сфокусированные ими три электронных луча направляются на экран под некоторым углом друг к другу. А теперь, уважаемый читатель, позвольте спросить вас, зачем нужны маски? Да, да, маски! Для маскарада, разумеется! Маска оказалась нужна в цветном кинескопе! Она представляет собой тонкий металлический лист, установленный перед самым экраном. В маске имеются отверстия диаметром 0,25 мм. Число их огромно: 550 000. Но это еще не самое удивительное. Люминофор черно-белой трубки чрезвычайно прост. Он нанесен внутри на экран, и все. А вот люминофор цветного кинескопа выполнен в виде мозаики из более чем полутора миллионов зернышек люминофоров красного, зеленого и синего свечения (*R, G, B*), причем расположены эти зернышки в строгом порядке позади отверстий маски. Представляете, какая нужна точность при изготовлении масочного цветного кинескопа!

Три луча от трех «прожекторов» направлены под некоторым углом друг к другу. Пройдя сквозь отверстие в маске, они попадают как раз на три зернышка люминофора. То же повторяется, когда лучи при развертке переместятся к соседнему отверстию. И так далее. В результате каждый из лучей вызывает свечение экрана только своим, определенным цветом. Сигнал яркостного канала из приемника подается на все три катода кинескопа и модулирует яркость всех трех лучей. Так формируется черно-белое изображение. А сигналы цветности из блока цветности подаются на управляющие электроды (сетки) трех электронных прожекторов и как бы «раскрашивают» изображение.

Надо отметить, что масочный цветной кинескоп отнюдь не последнее слово телевизионной техники. У него много недостатков, и самый главный из них – недостаточная яркость и сочность цветов изображения. Ведь площадь отверстий маски мала по сравнению с

площадью всего экрана, поэтому значительная часть тока лучей «съедается» маской и лишь небольшая часть электронов достигает экрана. В результате нужны высокие ускоряющие напряжения (25 кВ), большие токи лучей (по 0,3...0,4 мА на каждый), что требует мощного высоковольтного выпрямителя и мощных блоков развертки. Более совершенны недавно разработанные планарные кинескопы. В них три электронных прожектора расположены в один ряд. Маска заменена системой тонких проволок, расположенных перед экраном и своим электрическим полем, «распределяющим» лучи по цветным вертикальным полоскам люминофора. Яркость экрана такого кинескопа получается выше, а энергопотребление меньше. Но тонкие проволоки цветоделительной сетки можно закрепить лишь в натянутом состоянии: следовательно, экран должен быть плоским. В небольших по размерам кинескопах это еще возможно, но в больших кинескопах экран должен быть выпуклым, чтобы противостоять давлению окружающего воздуха, ведь внутри кинескопа – вакуум. Сила атмосферного давления на экран домашнего телевизора достигает двух – трех тонн! Около выпуклого экрана размещают теневую маску с удлиненными отверстиями, площадь которых составляет значительную часть общей площади маски. За каждым щелевидным отверстием в маске расположены три полоски люминофоров красного, зеленого и синего свечения на экране. Вся триада образует один элемент изображения. Благодаря штриховой структуре экрана неточность установки лучей по вертикали мало влияет на качество изображения.

Большой проблемой в цветных кинескопах является сведение лучей. Если первоначальной регулировкой удалось добиться точного



Планарный кинескоп

попадания трех лучей в одно отверстие маски в центре экрана, то вряд ли это получится на его краях. Для сведения лучей на всей площади экрана устанавливают дополнительные электромагниты динамического сведения, питаемые током специально подобранной формы. В современных планарных кинескопах используют самосведение лучей, осуществляемое специально сконструированной отклоняющей системой с неравномерным (астигматическим) магнитным полем. В новейших конструкциях и постоянный магнит статического сведения расположен в колбе трубки. Он намагничивается лишь однажды, при заводской регулировке кинескопа. Все эти меры заметно упрощают телевизионный приемник и повышают качество цветного изображения. Телевизоры нового поколения с планарным кинескопом совсем не имеют электронных ламп. Они собраны только на полупроводниковых приборах. А нельзя ли вообще избавиться и от последнего электровакуумного прибора – кинескопа? Здесь мы подошли к последнему разделу этой главы. Назовем его...

Будущее телевидения

Это будущее очень близко. Одна из японских фирм уже рекламировала телевизор, смонтированный в корпусе наручных часов. В нем нет, разумеется, никакого кинескопа, а экран выполнен на жидких кристаллах, примерно так же, как и циферблат обычных электронных часов. Четкость изображения, безусловно, невысока, да и контрастность черно-белого изображения оставляет желать лучшего. Заманчиво другое: не сделать ли экран в виде матрицы светодиодов? Сейчас уже разработаны и выпускаются светодиоды зеленого, красного и синего свечения. Как устроен светодиод? Довольно просто: миниатюрный кристаллик полупроводника закреплен на металлической подложке. Сверху напылен практически совсем прозрачный, настолько он тонок, металлический контакт. И все. Когда через светодиод проходит электрический ток, атомы полупроводника возбуждаются ударами носителей заряда, а возвращаясь в равновесное состояние, отдают накопленную энергию в виде квантов света.

Казалось бы, столь простое устройство можно было бы создать давным-давно, но этого не случилось. Нужна была очень совершенная технология производства полупроводников, надо было подобрать соответствующие материалы – арсенид галлия, фосфид галлия и некоторые другие. Хотя... первые светодиоды были изготовлены в кустарных условиях более полувека назад! Был в Нижегородской радиолаборатории, о которой я вам рассказывал в предыдущей главе, скромный молодой сотрудник О. В. Лосев. Фанатик радио, дни и ночи проводил он в лаборатории, экспериментируя с различными кристаллами для детекторных приемников. Я сказал «ночи» вовсе не для красного словца, ибо только глухой темной ночью удалось ему обнаружить слабое свечение той точки, где металлическое острие упиралось в кристалл. Свечение возникало в том случае, если к детектору (диоду) подводилось определенное напряжение от внешней батареи. О практическом применении светодиода в то время не могло быть и речи (да и названия такого – «светодиод» – еще не придумали), но явление-то было обнаружено. И еще одно замечательное открытие сделал О. В. Лосев, экспериментируя с диодами, на которые подавалось внешнее напряжение смещения. Оказалось, что диод может генерировать! И детекторный приемник

превратился в автодинный. Вот что писал редактор американского журнала Radio News, прочитав сообщение о работах О. В. Лосева: «Мы счастливы предложить вниманию наших читателей изобретение, которое открывает новую эпоху в радиоделе и которое получит большое значение в ближайшие годы. Молодой русский инженер О. В. Лосев подарил миру это изобретение, не взяв даже на него патента...».

Это написано в 1924 году, а «ближайшие годы» растянулись на полвека, ведь только в 60-70-х годах были выпущены промышленностью и стали использоваться в технике сверхвысоких частот туннельные диоды, диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды. Все эти полупроводниковые приборы имеют вольт-амперную характеристику с «падающим» участком, т. е. участком отрицательного сопротивления. Если рабочую точку диода вывести внешним напряжением смещения на этот участок, диод будет генерировать, причем на очень высоких частотах. Во всяком случае, вполне вероятно, что будущие телевизионные приемники, работающие в диапазонах ДМВ и сантиметровых волн (СМВ) будут иметь гетеродин, собранный на «генерирующем диоде». Очень жаль, что О. В. Лосев не увидел воплощения своих идей и изобретений: он погиб от голода в блокадном Ленинграде.

Но вернемся к матричному телевизионному экрану. Полтора миллиона цветных фотодиодов разместить на экране – задача вполне посильная современной микроэлектронике. Труднее другое – диоды надо «зажигать» по очереди, в соответствии с разверткой телевизионного растра. В принципе это тоже можно сделать с помощью сверхбольшой интегральной микросхемы (СБИС). И еще – яркостью



Будущее телевидения



Телевизионная приемная антенна типа «волновой канал»

свечения диодов надо управлять принятым телевизионным сигналом. Сделать все это пока достаточно трудно, но если сделать... телевизор можно будет повесить на стену, как картину! Четкость изображения получится необычно высокой, отпадут проблемы «сведения лучей», регулировки «чистоты цвета», характерные для современных телевизоров с кинескопами. А уж об энергопотреблении и говорить нечего – можно будет питать весь телевизор от батарейки карманного фонаря, ведь светодиоды потребляют ток всего несколько миллиампер при напряжении 2...3 В!

Ну а если читатель позволит мне помечтать, нарисуем такую картину: вы приехали на опушку леса, на пикник, развернули рулон вроде киноэкрана и повесили на соседнюю березу (а почему бы матричный экран и не сделать гибким, ведь есть уже батареи гибких солнечных элементов!). Направили небольшую чашу-антенну куда-то на юго-запад и немного вверх, и смотрите себе цветную передачу, транслируемую со спутника Земли!

Ну раз уж мы заговорили о непосредственном телевизионном вещании со спутников, то надо отметить, что сейчас оно очень быстро развивается. Собственно, передача телепрограмм через спутники-ретрансляторы началась уже с 60-х годов. Только приемные устройства или, скорее, приемные центры нужны достаточно большие, оснащенные крупногабаритными антеннами и высокочувствительными приемниками. У нас действует несколько таких систем: «Орбита», «Москва», «Экран», обслуживающие телевизионным вещанием самые отдаленные уголки страны.

Ближе всех к непосредственному телевизионному вещанию система «Экран». Приемная станция этой системы может быть установлена и на полевом стане, и на базе геологической экспедиции. Видимо, недалеко то время, когда любой телезритель в любой точке страны, направив в небо индивидуальную антенну, сможет смотреть несколько всесоюзных программ.

Новый качественный скачок в развитии телевидения может быть сделан с развитием сети кабельной связи и больших ЭВМ. Я собираюсь рассказать о «диалоговом» телевидении. Сейчас телезритель смотрит только то, что ему показывают, и никак не может повлиять на программу передач, разве что напишет письмо в телевизионную редакцию. А теперь представьте ситуацию: читая сложный научный труд или детектив (неважно, что именно), вы встретили незнакомое слово. Прекрасно. Включили телевизор. Набрали на клавиатуре заказ в библиотеку. Не прошло и двух минут,

как на экране вашего телевизора-дисплея появилось изображение страницы из Большой Советской Энциклопедии с объяснением данного слова.

В общем-то ничего сверхъестественного в нарисованной ситуации нет. Просто к телевизору должна быть присоединена небольшая буферная ЭВМ с достаточно большой памятью, подключенная широкополосной кабельной или световолоконной линией к общенациональной сети компьютерной связи. Ваш заказ вызовет из памяти большой ЭВМ (которая может находиться на очень большом расстоянии) соответствующую информацию. Последняя будет передана вашей персональной ЭВМ, обработана ею и воспроизведена на экране телевизора!

Опыты по передаче текстовой информации через существующие телепередатчики уже проводятся. Ведь телевизионный сигнал по своей природе не непрерывен – около 20% времени передачи отводится на обратный ход луча между строками и кадрами. В это время и можно передавать цифровую информацию, соответствующую нужному тексту. Телевизор оснащается дополнительным устройством для выделения и запоминания этой информации. С таким устройством телезритель получает возможность вызывать на экран субтитры к передаваемому фильму, узнавать расписание движения поездов и самолетов, сводку погоды и многое другое. Подобные системы уже эксплуатируются в ряде стран.

Следующим шагом в развитии телевидения будет внедрение систем телевидения высокой четкости. К единому мнению разработчики пока не пришли, но ожидается увеличение числа строк в кадре до 1000...1500 при соответствующем расширении полосы частот телевизионного сигнала. По этой причине передачи телевидения высокой четкости будут вестись в диапазонах ДМВ и СМВ. Ожидается и внедрение стереозвука в телевидение. Но раз уж зашла речь о звуке, следует рассказать о нем обстоятельнее и отвести для этого специальную главу.

8. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

В этой главе рассказывается о маленькой коробочке, в которой умещается пара симфонических или джаз-оркестров, о концертах на дому или в дороге, о великих изобретателях и любимых композиторах, о высоком качестве звуковоспроизведения и звучащем ведре, о магнитофонных проблемах и «умных» радиокомплексах.

Рождение идеи и первые опыты

Нас окружает целый мир звуков. С точки зрения чистой физики звук – это колебания плотности среды, чаще всего воздуха. Если не вдаваться в детали, то человеческий орган слуха устроен довольно просто. В глубине ушного прохода имеется мембрана – барабанная перепонка, воспринимающая эти колебания. С ней соприкасаются элементы, преобразующие колебания мембраны в поток электрических сигналов, передаваемых по нервным волокнам в

специальный отдел головного мозга, анализирующий эти сигналы и создающий в нашем сознании «звуковой образ».

Звук распространяется в виде волн сжатия и разрежения, скорость его при нормальных атмосферных условиях составляет всего 330 м/с. Энергия звуковых волн рассеивается в пространстве очень быстро, во-первых, из-за того, что излучатели звука в большинстве своем слабонаправленны (не каждый же раз кричат в рупор), а во-вторых, из-за поглощения в среде распространения (давно замечено, например, как «глохнет» звук в тумане). Все это отнюдь не способствует сохранению звуковых образов, а многие из них сохранить очень хотелось бы... Мысль о записи звуковых колебаний и последующем их воспроизведении возникла еще в середине прошлого века. Первый прибор для записи звуковых колебаний построил в 1857 году французский типограф из Мартенвиля Л. Скотт. Звуковые колебания, сконцентрированные большим параболическим рупором, подводились к мембране. С мембраной соединялось острие, оставлявшее след (звуковую дорожку) на покрытом сажей цилиндре, вращавшемся с помощью часового механизма с гирей или рукоятки. При разговоре перед рупором на поверхности цилиндра получалась запись звуковых колебаний. Скотт не решил обратной задачи,–задачи воспроизведения записанных колебаний. Эту задачу пытался решить другой французский изобретатель – Ш. Кро. В 1877 году он послал в Парижскую Академию наук описание «палеофона» – прибора для записи и воспроизведения «голосов минувшего». Запись в этом приборе велась уже не на цилиндр, а на плоский диск, покрытый сажей. Далее Кро предлагал с помощью фотографии перенести записанный звуковой след на клише, изготовленное из прочного вещества, и полученную таким образом пластинку использовать для воспроизведения записи. Осуществить задуманное Ш. Кро не удалось, так как он не получил необходимой финансовой поддержки. Тем не менее основные его идеи легли в основу граммофонной записи звука на пластинки.

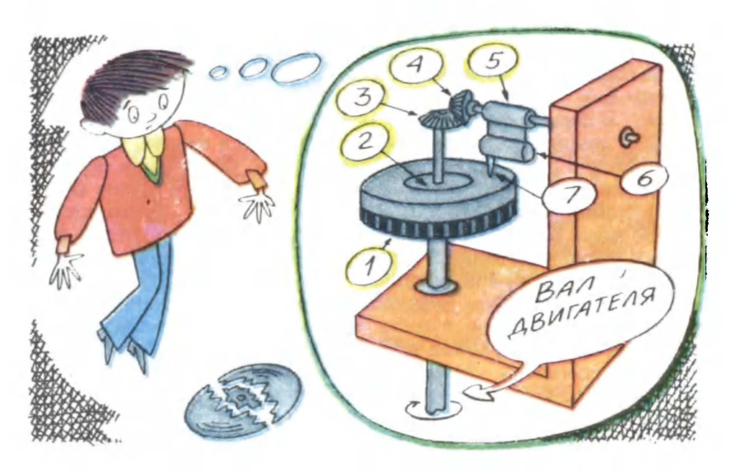
Создателем первых действующих аппаратов для записи и воспроизведения звука был Т. Эдисон. Упорство и работоспособность этого человека поистине замечательны. Он проводил тысячи опытов, изменяя состав покрытия валика, подбирая мембраны, рупора, механизмы вращения валика. Эдисон сконструировал прибор, названный им фонографом, а в 1878 году образовал даже компанию по их выпуску. В первых фонографах запись производилась на оловянной фольге, покрывающей поверхность цилиндра-валика, приводимого в движение рукояткой. Игла, связанная с мембраной, перемещалась вдоль валика, оставляя винтовой след. Недостатков было много: нестабильность скорости вращения валика приводила к искажению звука, запись на оловянной фольге быстро портилась при повторных воспроизведениях. Тем не менее успех фонографа был огромным. На Всемирной выставке в Париже в 1889 году перед павильоном с фонографом Эдисона выстраивались длинные очереди. Желающие могли прослушать запись через присоединенные к аппарату длинные каучуковые трубки, напоминающие современный медицинский стетоскоп. Одновременно одну и ту же запись могли слушать шесть человек. Работа над усовершенствованием фонографа продолжалась до 20-х годов нашего столетия, а полностью выпуск фонографов был прекращен лишь в 1929 году. Фонограф был вытеснен более совершенным аппаратом механической звукозаписи – граммофоном.

Первая патентная заявка на «граммофон с плоскими пластинками» была подана Э. Берлингуэром – молодым изобретателем, рабо-

тавшим в области телефонии. Запись звука в его приборе велась на горизонтально расположенном диске, покрытом сажей. Колебания иглы совершались не вверх и вниз, как в фонографе, а в поперечном направлении. Извилистый звуковой след на диске закреплялся лаком, после чего можно было изготовлять копии – грампластинки. Дальнейшая работа велась в направлении совершенствования технологии производства пластинок и подбора наилучшего состава смеси, из которой они штамповались. К 1893 году было налажено производство граммофонов и пластинок вновь организованной американской компанией, впоследствии Victor Co.

Система граммофонной записи относится к чисто механическим видам звукозаписи. У нее много недостатков. В студиях оркестр, исполнители и дикторы помещались в узких помещениях, напоминающих формой рупор. Исполнение должно было быть достаточно громким – все это делалось для того, чтобы сконцентрировать звук в направлении мембраны рекордера. Граммофоны снабжались большой трубой – рупором, чтобы усилить звучание. Разработанный впоследствии и широко распространенный патефон также оснащался рупором, только этот рупор был компактно спрятан внутри патефонного ящика. Для получения достаточной громкости звука звуковая дорожка на пластинке должна была обеспечивать значительную амплитуду колебаний иглы. А это препятствовало «сжатию» записи, и длительность звучания даже «пластинок-гигантов» диаметром 30 см не превосходила четырех минут. В этих условиях улучшить качество звукозаписи было очень трудно.

На помощь пришла электроника. Сначала появились электрические устройства для записи – рекордеры. Собственно, первый электрический рекордер изобрел еще Т. Эдисон, назвав его телефонографом. В этом устройстве мембрана фонографа приводилась в колебательное движение не звуковыми волнами, а электромагнитом, присоединенным к телефонной линии. Так впервые была осуществлена запись телефонного разговора. В начале века в студиях грамзаписи



Станок для электрической записи грампластинок:
1 – *планшайба;* 2 – *диск;* 3, 4 – *зубчатая передача;* 5 – *ходовой винт;* 6 – *рекордер;* 7 – *резец*

стали применять микрофоны. Звуковые колебания после усиления подводились к рекордеру – устройству, преобразующему электрические колебания в колебания алмазного резца, «вырезающего» извилистую звуковую дорожку на граммофонном диске. Если диск был целлулоидным, то его можно было проигрывать на обычном патефоне сразу после записи. Подобным образом изготавливают «говорящие письма».

В студиях электрический рекордер позволял получать хорошие записи на восковом диске, с которого потом изготавливалась (отливалась) матрица и печатались настоящие пластинки из шеллачной или винилитовой массы.

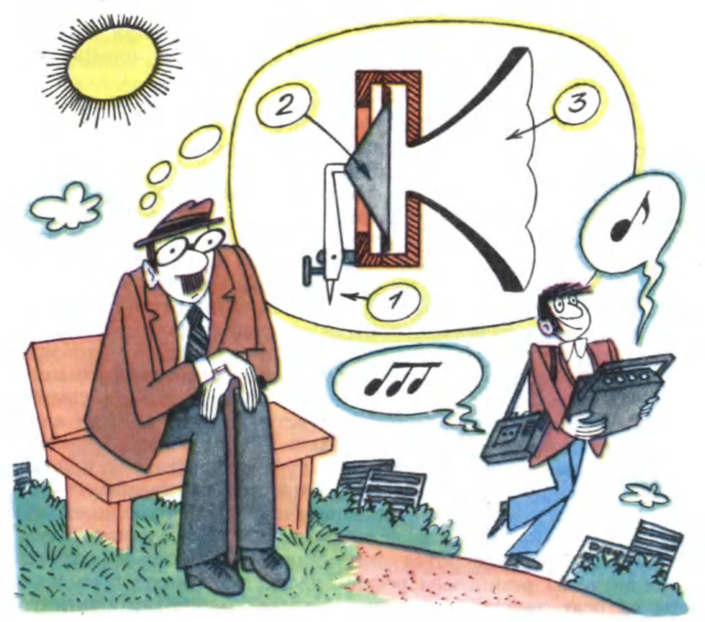
Современная техника грамзаписи

Следующим шагом в механической звукозаписи был отказ от граммофонов и патефонов и переход к электрическому воспроизведению. Появился адаптер – устройство для преобразования колебаний иглы в электрический сигнал. Этот сигнал можно было усилить до любого необходимого уровня и подвести к громкоговорителю. При электрической грамзаписи не нужна большая амплитуда колебаний звуковой дорожки на пластинке, и плотность записи удалось значительно повысить. Появились долгоиграющие пластинки с микроскопической канавкой и большим временем звучания. Заметно возросло и качество звукозаписи. Давайте не будем подробно рассматривать технологию производства долгоиграющих пластинок. В принципе она осталась той же, что и для обычных пластинок. Рассмотрим аппараты для воспроизведения записи – проигрыватели – и обсудим проблемы, связанные с повышением качества звуковоспроизведения.

Прежде всего пластинку нужно привести во вращательное движение. Тут не обойтись без электрического двигателя. Согласитесь, что несерьезно в наш электронный век заниматься пружинными приводами с заводной ручкой, как у патефона! В относительно дешевых, массовых проигрывателях используют двигатели переменного тока, питаемые непосредственно от сети. К тонкому валу двигателя прижимается обрезиненный ролик, касающийся также и внутренней поверхности диска, на который кладется пластинка. Диаметры вала и диска подобраны так, чтобы получить требуемую скорость вращения пластинки $33^1/_3$ об/мин. В некоторых моделях предусматривают механическое переключение скорости на 45 об/мин (зарубежный стандарт) и 78 об/мин (старые, недолгоиграющие пластинки). К недостаткам подобного привода относится повышенный шум, создаваемый двигателем. Его шум не только слышен непосредственно, но и передается на чувствительный элемент адаптера механическим путем, проникая таким образом в электрический канал воспроизведения. Для борьбы с шумом и двигатель, и звукосниматель-адаптер тщательно амортизируют. Обрезиненный ролик тоже вносит лепту, вызывая своими неровностями малые колебания скорости диска, называемые детонациями. В более совершенных проигрывателях отказываются от обрезиненного ролика и заменяют его бесконечным резиновым ремнем-пассиком, проходящим через шкивы на осях двигателя и диска. Пассик хорошо амортизирует вибрации двигателя, но хлопот с ним больше, и надежность системы получается ниже.



Рекордер



Головка граммофона:
1 – игла; 2 – мембрана; 3 – рупор

Диск проигрывателя в любом случае стараются делать потяжелее, чтобы своей инерцией он сглаживал рывки и детонации привода. Здесь важна не сама по себе масса диска, а его момент инерции. Больший момент инерции получается у дисков большого диаметра с массивным ободом. Подшипники диска выполняют с особой тщательностью, а сам диск подгоняют до точного совпадения его центра инерции с осью вращения, чтобы устранить возможные биения диска при вращении. Если не требовать быстрого раскручивания и быстрой остановки диска (а это обычно не нужно), то привод диска может быть совсем маломощным – ведь остается преодолеть лишь малую силу трения в подшипниках. В дорогих моделях проигрывателей отказались от двигателя переменного тока и стали применять микродвигатели, питаемые от стабилизированного источника постоянного напряжения, тем самым снижали шум и вибрации.

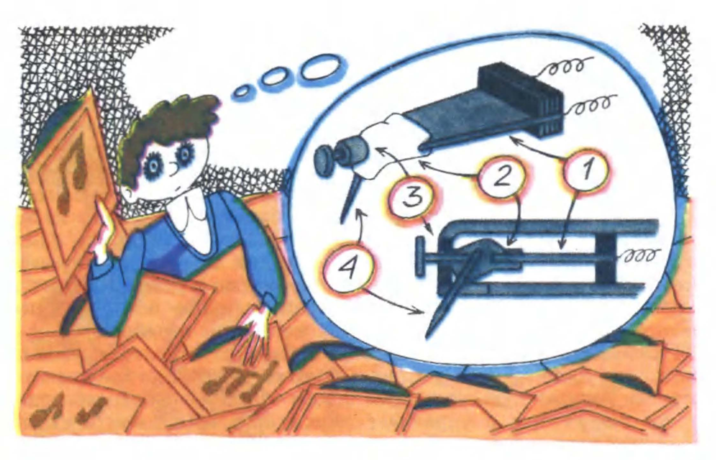
Наиболее совершенным считают привод от двигателя, выполненного как одно целое с диском. Обмотки этого многополюсного двигателя питают пульсирующим током от специального транзисторного генератора, а управляет генератором фотоэлектрический датчик скорости вращения, закрепленный у обода того же диска. Вся система позволяет поддерживать очень высокую стабильность скорости вращения диска.

Другой очень ответственный узел проигрывателя – звукосниматель с держателем или, как его называют, тонармом. Самый простой звукосниматель – пьезоэлектрический. Игла, бегущая по звуковой дорожке, скреплена с небольшой прямоугольной пластинкой из пьезокерамики. Вибрации иглы передаются пластинке, и на ее поверхности возникает переменный потенциал звуковой частоты. Через специальные выводы он подводится к усилителю. Пьезоэлектрический звукосниматель очень высокого качества трудно изготовить по многим причинам. Пьезоэлемент жесткий, поэтому игла оказывает повышенное давление на стенки извилистой звуковой дорожки на пластинке. У пьезоэлемента много побочных механических резонансов, и поэтому трудно получить равномерную частотную характеристику звукоснимателя. По этим причинам пьезоэлектрические звукосниматели используют лишь в дешевых моделях проигрывателей.

В электромагнитной головке звукоснимателя с иглой скреплен крошечный магнит, около которого находится катушка с большим числом витков очень тонкого провода. Вибрация магнита изменяет магнитный поток, пронизывающий витки катушки, и наводит на них ЭДС индукции, изменяющуюся в такт с колебаниями иглы. Иногда магнит делают неподвижным, а с иглой скрепляют миниатюрную катушку. Чем легче подвижная система звукоснимателя и чем выше ее гибкость, тем точнее игла отслеживает извилины звуковой дорожки. При этом повышается качество звуковоспроизведения и уменьшается износ пластинки. Другой фактор, влияющий на износ пластинок,– прижимная сила на кончике иглы, проще говоря, сила, с которой игла давит на пластинку.

У первых патефонов и граммофонов эта сила составляла многие десятки и даже сотни грамм (физики знают, что силу надо измерять в ньютонах, но для всех эта единица уж очень непривычна). Один грамм силы – внесистемная единица – составляет 9,8 миллиньютон, в которых справочники и дают прижимную силу звукоснимателей.

Современные звукосниматели почти не нажимают иглой на пластинку – прижимная сила не превосходит нескольких грамм. С уменьшением прижимной силы должна увеличиваться и гибкость подвижной системы, иначе игла будет «выпрыгивать» из звуковой



Пьезоэлектрический звукосниматель:
1 – пьезокристалл; 2 – иглодержатель; 3 - упругая втулка; 4 – игла

канавки. Как видим, современный звукосниматель представляет собой очень тонкий, сложный и дорогой механизм! Если ранее жесткая и сильно прижатая игла действовала на пластину подобно резцу (разве что стружка не вилась из-под иглы!), то теперь легчайшее прикосновение полированной алмазной иглы почти не портит пластинку. Любители грамзаписи хорошо знают: пластинку, предназначенную для хорошего проигрывателя, никогда нельзя проигрывать на более дешевых аппаратах с большой прижимной силой и малой гибкостью подвеса иглы.

Немало хлопот любителям грамзаписи доставляет и тонарм. Обычный поворотный тонарм в принципе не может удерживать звукосниматель на касательной линии к звуковой дорожке. Ситуация улучшится, если тонарм изогнуть и несколько удлинить, как обычно и делают в большинстве проигрывателей. Но при таком решении на иглу действует дополнительная, так называемая скатывающая сила, направленная по радиусу пластинки. Для ее компенсации используют грузики на тонких нитях или специальные подвесы тонарма. Наиболее совершенными считаются тангенциальные тонармы, основание которых перемещается по мере передвижения иглы к центру пластинки. Для движения тонарма служит специальный следящий привод.

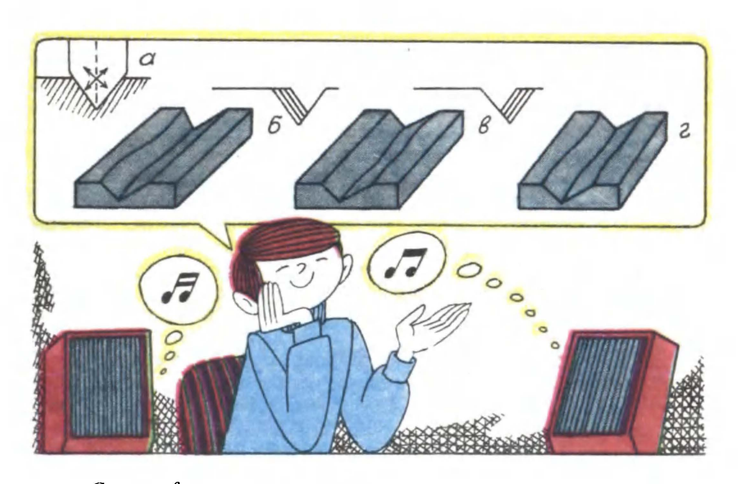
Хотя мы упомянули далеко не все проблемы, связанные с конструкцией современного проигрывателя, перечисленных достаточно, чтобы составить представление о том, сколь сложной и тонкой машиной он оказался! К тому же проигрыватель обрастает массой дополнительных устройств и механизмов. Легкий звукосниматель с гибким подвесом нежелательно ставить и снимать с пластинки рукой: можно повредить и пластинку, и звукосниматель. Используют специальный механизм для подвода иглы к началу звуковой дорожки и плавного опускания ее... Зачем же нужны и что дают все эти сложные усовершенствования? Ответ один – высокую верность звуковоспроизведения. И действительно, переход к микро-

записи на долгоиграющие пластинки позволил значительно расширить полосу записываемых звуковых частот.

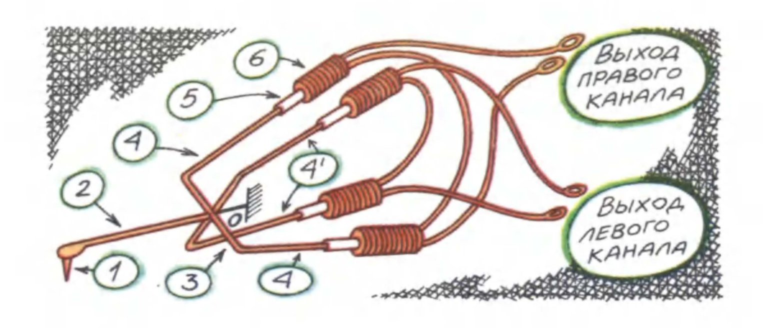
Старинные патефоны воспроизводили узкий диапазон частот, скажем от 300 Гц до 3...4 кГц. Этого достаточно, чтобы узнать голос певца, но говорить о естественности звучания вовсе не приходится. Как это объяснить? Просто. Посмотрим внимательнее, хотя бы сквозь сильную лупу, на волнистую звуковую дорожку. Чем выше частота звуковых колебаний, тем круче становятся извилинки дорожки. Жесткая игла патефона или тяжелого звукоснимателя уже не может следовать за ними и разрушает стенки дорожки, перескакивает с одной дорожки на другую. Можно увеличить скорость вращения пластинки, но это не выход – сократится время звучания. Остается уменьшить амплитуду записи и одновременно ширину звуковой канавки. Так пришли к долгоиграющим пластинкам. Большинство из них выпускают со стереофонической записью.

На стереопластинке одна звуковая дорожка содержит запись двух звуковых каналов – от левого и правого микрофонов. Сейчас повсеместно принята система 45/45, обозначаемая символом «х». В этой системе сигналы двух каналов записываются на двух взаимно перпендикулярных стенках звуковой канавки, расположенных под углом 45° к поверхности пластинки. На рисунках показано, как движется резец рекордера при записи одного из каналов – левого или правого. Если же сигналы в обоих каналах одинаковы, получается обычная поперечная запись.

Для воспроизведения стереопластинки нужен стереофонический звукосниматель. В нем имеются два пьезокристалла (или две катушки), расположенные наклонно под углом 45° к горизонтали и перпендикулярно друг к другу. Каждый элемент воспроизводит звуковые колебания только «своего» канала. В качестве примера на рисунке показано возможное устройство магнитной стереофонической головки, относящейся к классу головок с подвижными магнитами. Колебания иглы *1*, следующей по звуковой дорожке пластинки,



Стереофоническая грамзапись:
а – движение иглы; б – запись только левого канала; в – запись только правого канала; г – запись двух каналов



Устройство электромагнитной головки стереофонического звукоснимателя:
1 – игла; 2 – иглодержатель; 3 – крестовина; 4, 4' – тяги магнитов; 5 – магниты; 6 – катушки

через иглодержатель *2* передаются крестовине (или кольцу) *3*, шарнирно закрепленному в точке *О*. С крестовиной также шарнирно связаны тяги *4* и *4'*, на концах которых закреплены миниатюрные магниты. Плечи крестовины расположены под углом 45° к горизонтали, поэтому тяги *4* перемещаются только под действием колебаний, записанных в правом канале, а тяги *4'* – в левом (взгляните еще раз на предыдущий рисунок, где изображена звуковая дорожка). Остальное несложно. Перемещаясь по оси катушек *6*, магниты *5* наводят в них ЭДС, пропорциональную скорости изменения магнитного потока, а следовательно, и скорости колебаний и магнитов, и кончика иглы. Пары катушек каждого канала соединены последовательно, чтобы ЭДС, наводимые в них, складывались.

Что произойдет, если стереопластинку поставить на обычный, монофонический проигрыватель? Будут воспроизводиться колебания иглы только в поперечном направлении, вызываемые извилинами обеих стенок канавки. Следовательно, воспроизведется монофонический сигнал, образованный суммой сигналов левого и правого каналов. Принятая система стереофонической грамзаписи полностью совместима с монофонической техникой.

У грамзаписи много достоинств, но есть и один существенный недостаток: пластинку, которая «разонравилась», нельзя переписать заново. Да и вообще, любитель грамзаписи не может записать услышанную и понравившуюся мелодию – он должен ждать, когда это сделает за него фирма «Мелодия», выпускающая грампластинки. Совсем по-другому обстоят дела у любителей магнитной записи. Они могут записывать сами, что хотят и когда хотят.

Магнитная запись звука

Магнитофон прочно вошел в нашу жизнь. Равнодушных здесь нет – один мечтает о «маге», другой имеет его, но недоволен и хочет приобрести другую модель, третьему он уже надоел, но продать или подарить его жалко...

Посмотрим, как устроен магнитофон. Вопросов возникнет много: почему запись ведется именно на пленку? Откуда взялось значение скорости 4,75 см/с? И т. д.

В первых опытах по магнитной записи звука никакой пленки действительно не было. Запись вели на тонкую стальную проволоку, перематываемую с катушки на катушку. Проволока оказалась плохим носителем: она легко размагничивалась, велик был копирэффект (намагничивание одного витка проволоки на катушке магнитным полем другого, соседнего витка), и от проволоки в конце концов отказались. Может быть, идею записи на пленку подсказало кино – ведь там тоже запись ведется на пленку, правда, оптическим способом. Как и кинопленка, магнитная лента имеет основу из пластмассы, например поливинилхлорида, терилена, а в последнее время – лавсана. Основа с одной стороны покрыта тонким слоем магнитодиэлектрика. Чаще всего это окись железа Fe_2O_3 или его закись Fe_3O_4. Используют также сплавы железа, кобальта и двуокись хрома CrO_2.

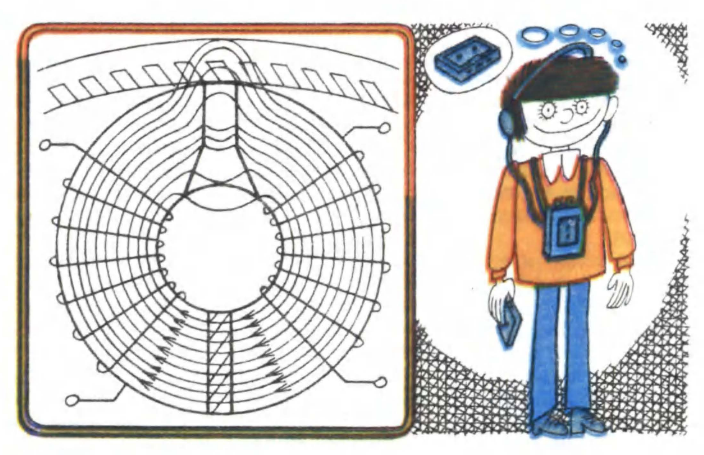
Принцип магнитной записи звука объяснить несложно. Лента протягивается с постоянной скоростью мимо магнитной головки. При записи по обмотке головки проходит переменный ток звуковой частоты, соответствующий записываемой программе. Ферромагнитный слой ленты намагничивается в такт со звуковыми колебаниями, и записанная магнитная фонограмма может храниться сколь угодно долго. При воспроизведении лента снова протягивается около магнитной головки. Никакого тока в это время в головку не подается, а выводы ее обмотки подключаются ко входу усилителя воспроизведения. Магнитный поток ленты, проходя через сердечник головки, наводит в ее обмотке ЭДС самоиндукции в полном соответствии с записанной программой. Для записи и воспроизведения звука в профессиональных магнитофонах используют различные головки.

Магнитное поле головки направлено вдоль ленты, таким образом осуществляется продольная запись. Это не единственно возможный вариант. Возможна в принципе и поперечная запись, при которой магнитное поле головки направлено поперек направления движения ленты. Но получить приемлемые качество и уровень записи в этом случае не удается. Огромное значение имеет ширина зазора магнитной головки. Чем она меньше, тем более высокие частоты удается записать и воспроизвести при данной скорости движения ленты. Давайте немного посчитаем. При скорости движения ленты 4,75 см/с современные магнитофоны воспроизводят частоты до 12 кГц. Это значит, что длина самой короткой магнитной волны на пленке составляет $\lambda = v/f = 4{,}75$ см/с/12000 1/с ≈ 4 мкм. Всего четыре микрометра! Если ширина зазора головки будет больше половины длины этой волны, то воспроизвести сигнал не удастся: на ширине зазора уложится более полуволны сигнала и результирующее магнитное поле в магнитопроводе головки будет близко к нулю. Раньше, когда не умели изготавливать высококачественные головки со столь малыми зазорами, приходилось увеличивать скорость движения ленты. Длина волны записи при этом возрастала.

Существенно и другое – материал магнитной ленты. Когда на расстоянии двух микрометров друг от друга находятся области с противоположной намагниченностью, у них есть все шансы скомпенсировать остаточную индукцию, т. е., попросту говоря, размагнититься. Вот почему на старых пленках столь короткую длину волны записи получить не удавалось. Скорость движения ленты в прежних профессиональных (студийных) магнитофонах составляла 76 см/с. Другие скорости получались последовательным делением этой величины на два: 38; 19,5 см/с. Последнее значение скорости долго было принято в высококачественных бытовых магнитофонах. Благодаря

Бобина 1
Бобина 2
ГС
ГЗ
ГВ
Генератор высокой частоты
Усилитель воспроизведения
Усилитель записи
Выход
Вход

Устройство магнитофона (ГС, ГЗ, ГВ – головки стирания, записи и воспроизведения)



Магнитный поток головки

выпуску новых сортов пленки и разработке более совершенных головок появилось новое значение скорости: 9,5 см/с. Вспоминается, с каким восхищением в свое время говорили о том, что на этой скорости удалось записать полосу частот 12, 14 и, наконец, 18 кГц.

Все это относится к катушечным магнитофонам. В них использовалась стандартная лента шириной 6,25 мм. Ну а толщина ленты была предметом многих и многих забот технологов. Ведь чем тоньше лента, тем больше ее войдет на стандартную катушку, тем больше будет время записи. К тому же тонкая лента мягче и лучше прилегает к рабочему зазору головки. Это – с одной стороны, а с другой, лента должна быть прочной и не растягиваться в лентопротяжном механизме. Чтобы хорошо прижать ленту к головке, ее надо сильно натянуть. Эти факторы ограничивают минимальную толщину ленты. Раньше выпускались ленты на ацетатной основе толщиной 37 и 55 мкм. Современные ленты на лавсановой основе значительно тоньше: 18...27 мкм.

Подлинную революцию в магнитной записи звука произвели кассеты. Согласитесь, что не совсем удобно каждый раз закреплять конец ленты на катушке и закладывать ленту в прорезь корпуса лентопротяжного механизма. Кассета сразу решила все эти проблемы. В кассетах используют еще более тонкие и узкие ленты, намотанные на две бобышки, постоянно расположенные в кассете, Кассетные магнитофоны стали легче, удобнее, появились портативные модели с батарейным питанием. Часто попадаются в скверах, на улицах, в аудиториях институтов, техникумов и в метро молодые люди с карманным магнитофоном-проигрывателем (плейером) и легкими стереонаушниками. Надо ли говорить, что такой молодой человек плохо воспринимает внешний мир, оглушенный стереомузыкой (часто довольно низкопробной), он является вероятным кандидатом в жертвы дорожно-транспортных происшествий, а уж в аудиториях проводит время совершенно зря.

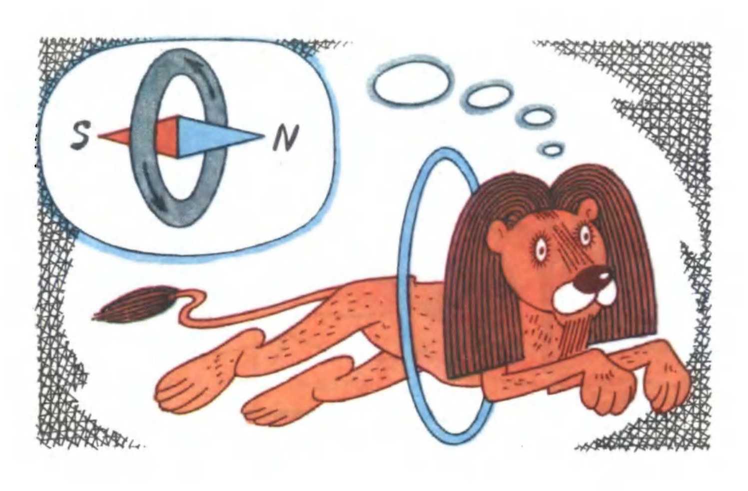
Но довольно о печальных последствиях усовершенствованной технологии, породившей «магнитофонный бум». Обратимся к физическим основам магнитной записи. Почему, собственно, на пленке остается записанный звуковой сигнал? Почему он не исчезает, как только перестает действовать магнитное поле головки? Таково свойство ферромагнетиков – веществ с очень высокой магнитной проницаемостью. Что это такое? – Коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличивается магнитная индукция в веществе по сравнению с пустым пространством. Магнитное поле создается электрическим током. Магнитные силовые линии, проведенные в направлении вектора магнитной индукции $\bar{B}$, по форме представляют собой кольца, нанизанные на провод с током. Если провод свернуть в кольцо, магнитная индукция возрастет. Сделаем кольцо из нескольких витков и таким образом заставим ток несколько раз обегать наше кольцо. Во столько же раз возрастет и магнитная индукция. У нас получилась катушка индуктивности, создающая магнитное поле при пропускании через нее тока. Введем в катушку сердечник из железа, феррита или другого ферромагнетика. Магнитное поле возрастет. Но почему, ведь ток-то мы не увеличивали?! Оказывается, в железе, как и в любом ферромагнетике, есть свои крошечные, как говорят, элементарные магнитики. Простейший атом с одним электроном, вращающийся со скоростью v вокруг ядра, уже является элементарным магнитом, ведь движущийся заряд – электрон – это кольцевой ток, создающий свое собственное магнитное поле. Кроме того, электрон обладает еще и собственным магнитным моментом, обусловленным, как можно себе предста-

вить, быстрым вращением электрона вокруг собственной оси – его спином. Отдельно взятые магнитные поля атомов очень слабы. Но когда вещество ферромагнетика кристаллизуется из расплава, электроны ориентируются своими магнитными полями в одну сторону. Образуется микрокристаллик – домéн,– в котором все элементарные магнитные поля складываются и образуют уже значительное магнитное поле домéна. Но если кусок ферромагнетика не намагничен, то магнитные поля домéнов ориентированы как попало, хаотически, и общее магнитное поле в веществе отсутствует. Картина сразу меняется, если ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле (в катушку индуктивности). Внешнее поле заставляет магнитные поля доменов поворачиваться, ориентироваться в одном направлении. Теперь к внешнему полю добавляются собственные поля доменов, и общее магнитное поле возрастает.

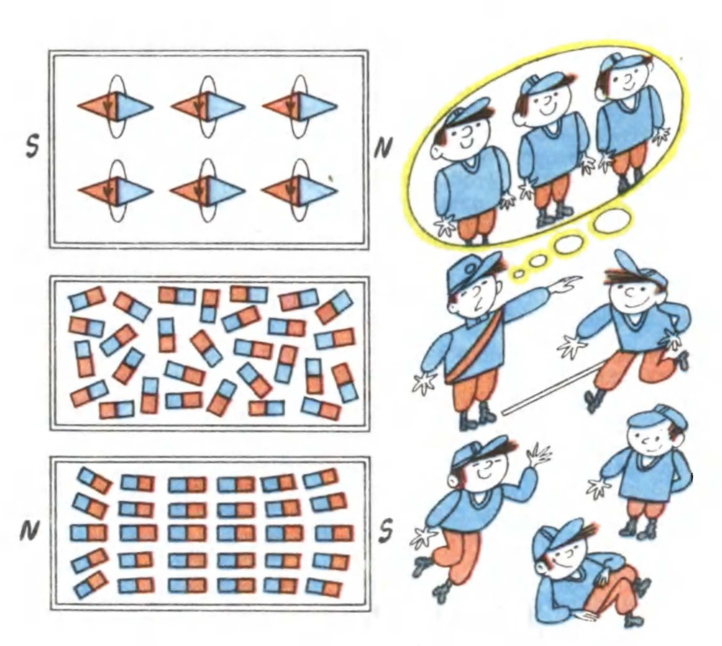
Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков очень велика: она может достигать нескольких тысяч и даже десятков тысяч. Во столько же раз возрастает и магнитное поле в сердечнике. Вот какой огромный эффект создают крошечные элементарные магнитики – домéны! Поэтому все катушки в электротехнических устройствах – трансформаторах, двигателях, электромагнитах и в той же головке магнитофона – обязательно наматывают на ферромагнитных сердечниках. Без магнитопровода потребовалось бы гораздо больше витков, а в ряде случаев устройство и вообще нельзя было бы изготовить.

А зависят ли магнитные свойства ферромагнетика от величины приложенного магнитного поля? Оказывается, зависят, и очень сильно. Эту зависимость лучше всего изобразить графически. Отметим по горизонтали напряженность внешнего магнитного поля H. Она пропорциональна силе тока в катушке. А по вертикали отложим магнитную индукцию в магнитопроводе B. На начальном участке кривой при малом токе в катушке индукция возрастает не очень быстро. Домены поворачиваются в направлении поля как бы нехотя. Затем магнитная индукция возрастает быстрее. В этой части кривая намагничивания идет круто вверх. Наконец, все домены поворачиваются по полю и индукция перестает расти. Кривая намагничивания теперь идет почти горизонтально, и магнитная проницаемость резко падает. Это явление называется насыщением, а предельная величина индукции в магнитопроводе – индукцией насыщения $B_{нас}$. То, что у нас получилось, называется основной кривой намагничивания.

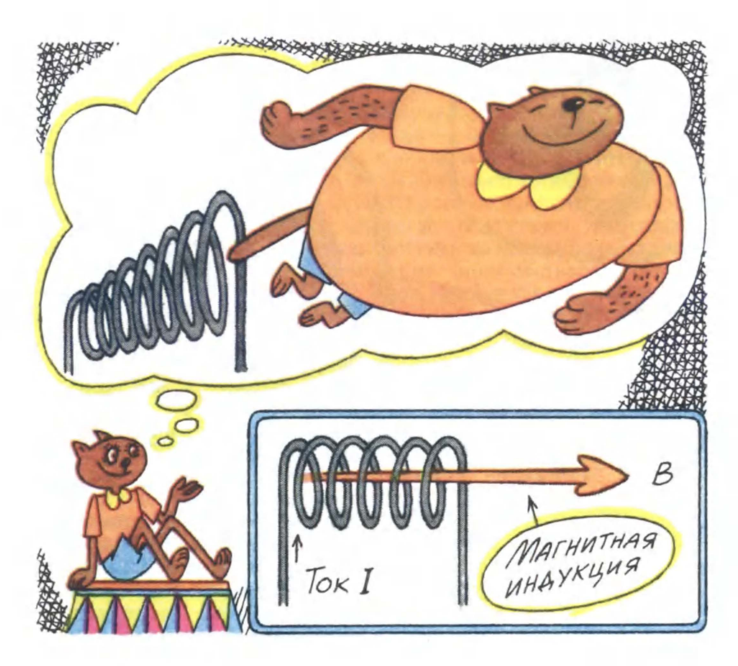
Еще более интересные явления произойдут, если мы доведем ферромагнетик до насыщения и будем уменьшать внешнее поле. В этом случае разные ферромагнетики ведут себя по-разному. У магнитомягких материалов, к которым относится, например, железо, индукция будет уменьшаться и исчезнет вместе с внешним полем. Из магнитомягких материалов делают сердечники электромагнитов, используемых, например в реле. Пока в обмотке течет ток, магнитопровод намагничен и притягивает магнитные предметы. Но стоит ток выключить, как все магнитные свойства сердечника исчезают, и он остается таким же простым куском железа, каким и был раньше. Иначе обстоят дела у магнитотвердых материалов. Ток в катушке можно уменьшить до нуля, но намагниченность магнитопровода не исчезает! Он продолжает притягивать ферромагнитные предметы. Собственно, именно так и изготавливают постоянные магниты в форме подковы, бруска или магнитной стрелки компаса. На нашей кривой линия раздваивается: при увеличении напряженности магнитного поля мы движемся по уже знакомой кривой



Магнитное поле кругового тока



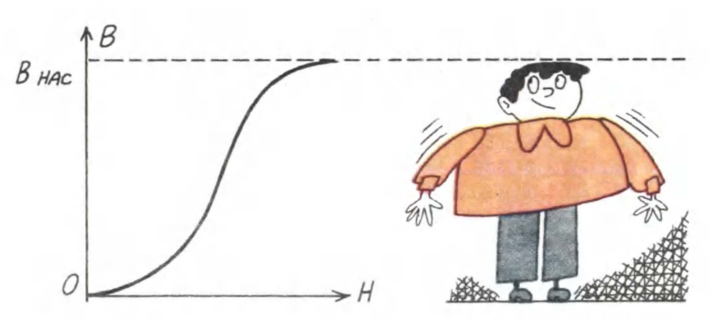
Круговые токи в атомах приводят к намагничиванию тела, как целого



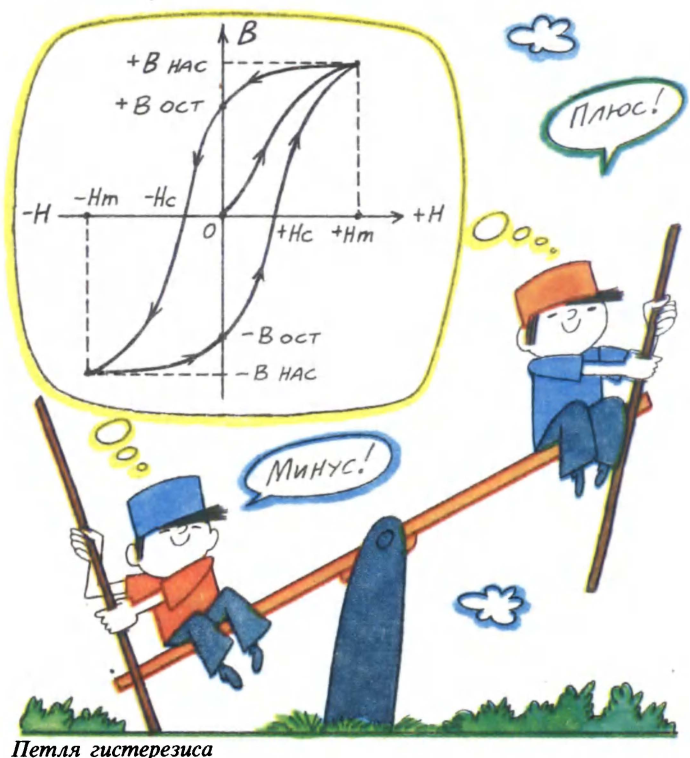
Магнитное поле катушки

намагничивания, а при уменьшении – по другой кривой, проходящей заметно выше. И когда ток в катушке, а следовательно, и H обращаются в нуль, индукция магнитопровода не исчезает, а остается равной некоторой величине $B_{ост}$, которая так и называется – остаточная индукция. Чтобы размагнитить сердечник, надо пустить ток противоположного направления. Напряженность поля, при которой индукция B обратится в нуль, называется коэрцитивной силой H_c. Чем больше коэрцитивная сила, тем труднее размагнитить данный ферромагнетик.

Если еще увеличить в катушке ток противоположного направления, мы снова намагнитим магнитопровод, но его полюсы поме-



Кривая намагничивания



Петля гистерезиса

няются местами. Опять можно прийти к индукции насыщения $B_{нас}$, уменьшив ток до нуля,– к остаточной индукции $B_{ост}$, и т. д. Периодически перемагничивая магнитопровод, мы получаем некоторую замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса. Чем больше площадь петли, тем большую работу надо затратить на перемагничивание ферромагнетика.

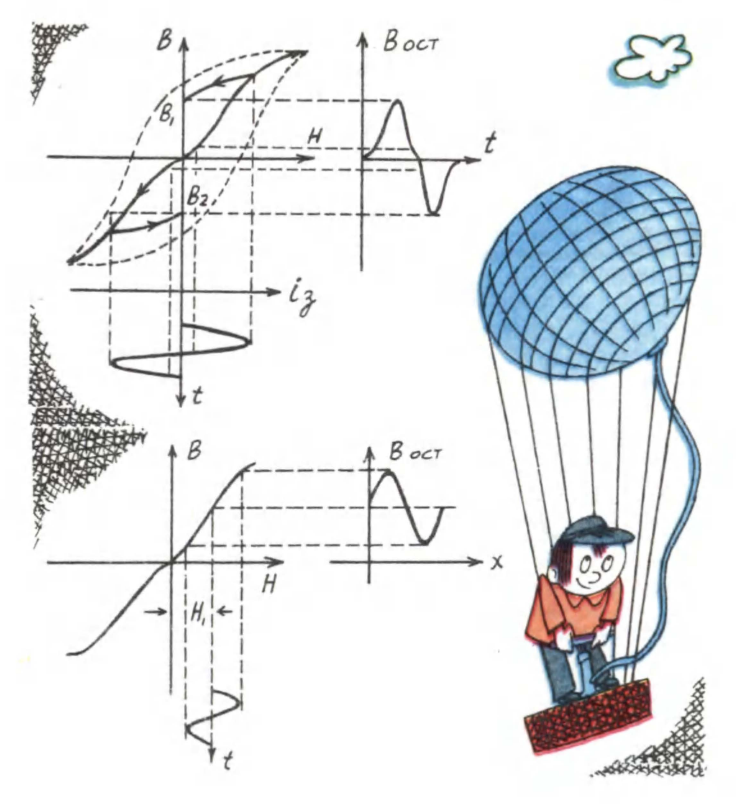
Доме́нная теория легко объясняет все описанные явления. Первоначально доме́ны – элементарные магнитики вещества – расположены хаотично. Внешнее поле ориентирует их, и уже повернувшиеся доме́ны помогают своим полем и остальным повернуться в том же направлении. Этим объясняется возрастание крутизны кривой намагничивания при умеренных полях. При насыщении все доме́ны повернулись по направлению поля и индукция возрастать более не может. Ну а когда внешнее поле исчезает, доме́ны магнитотвердого ферромагнетика сохраняют свою ориентацию, создавая остаточную индукцию.

Теперь становится ясно, какой материал нужен для рабочего ферромагнитного слоя магнитной ленты. Магнитомягкий материал не подходит: запись на нем исчезает сразу, как только данный участок ленты пройдет мимо головки. Нужен магнитотвердый материал с большой остаточной индукцией. Чем она больше, тем бо́льшим может быть уровень записи.

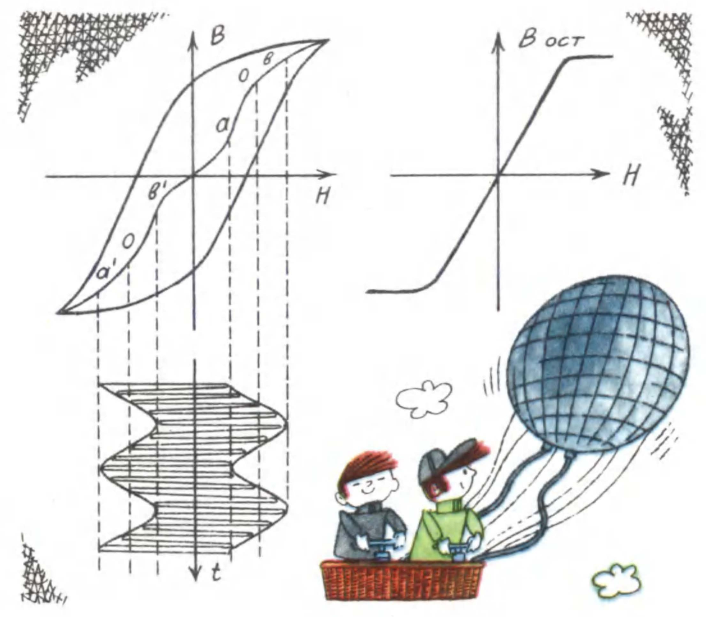
Для стирания записи используют высокочастотный способ размагничивания ленты. В стирающую головку подается переменный ток высокой частоты 40...100 кГц. Каждый участок ленты, проходя мимо зазора головки, несколько раз перемагничивается от насыщения до насыщения. Но затем, по мере удаления этого участка от зазора, перемагничивание будет происходить все в меньших пределах. На графике это можно изобразить спиралью сложной формы, состоящей из ряда все уменьшающихся петель гистерезиса. Для хорошего стирания необходимо, чтобы за время прохождения зазора головки пленка перемагнитилась много раз (не менее 100... ...200). В результате остаточная индукция ленты станет равной нулю.

Стереть запись с магнитной ленты можно и не перематывая ее лентопротяжным механизмом. Для этого достаточно поместить ленту (на катушке или в кассете) в сильное магнитное поле. Поэтому остерегайтесь оставлять кассету рядом с источниками постоянных или переменных магнитных полей: трансформаторами, магнитами, стабилизаторами напряжения, двигателями.

Теперь мы подошли к обсуждению самых главных процессов в магнитной записи – процессов собственно записи и воспроизведения.

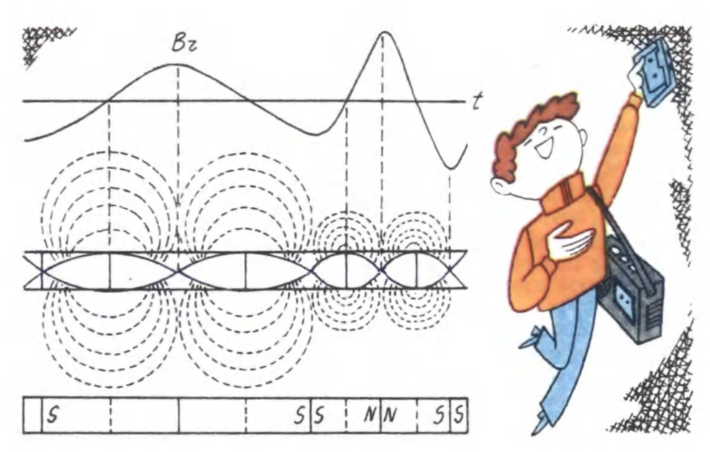


Запись с подмагничиванием постоянным током



Запись с высокочастотным подмагничиванием

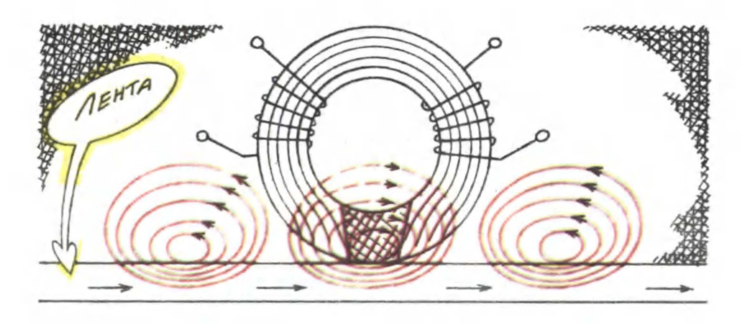
Казалось бы, чего проще – подать ток звуковой частоты в обмотку головки и получить запись. Запись, конечно, получится, но качество ее будет очень низким. Чтобы понять, в чем здесь дело, достаточно посмотреть на основную кривую намагничивания материала пленки. Она показана для намагничивания в обоих направлениях. Поскольку начальный участок кривой пологий, намагничивание пленки при слабых сигналах происходит плохо. Если на головку подается синусоидальный звуковой сигнал, то остаточная индукция пленки оказывается далеко не синусоидальной. Исправить положение можно, подав в головку постоянный ток подмагничивания и сместив начальную точку на крутой и более или менее линейный участок кривой. Но это плохой выход, так как динамический диапазон записи получается небольшим, а в паузах записи возникает шум намагниченной пленки. Поэтому во всех современных магнитофонах применяют подмагничивание высокочастотным током, обычно той же частоты, которая используется и для стирания старой записи. При высокочастотном подмагничивании в обмотку головки подаются сразу два сигнала: один – звуковой частоты и переменной амплитуды, а другой – высокочастотный и постоянной амплитуды. Высокочастотное магнитное поле как бы раскачивает домены ферромагнетика, разрушая жесткие связи между ними и облегчая намагничивание пленки. Очень важен правильный выбор тока подмагничивания – высокочастотные колебания должны выводить наложенные на них звуковые на середину крутого участка кривой намагничивания. Поскольку высокочастотные колебания успевают перемагнитить пленку несколько раз, пока она проходит мимо зазора головки, в записи этих колебаний практически не остается. К тому же их



Запись на магнитной ленте

частота лежит в неслышимой ультразвуковой области и не пропускается усилителем воспроизведения.

Итак, пленка намагничена в соответствии с записываемым звуковым сигналом. Теперь надо воспроизвести запись. В профессиональных магнитофонах для воспроизведения используют отдельную головку, такую же по конструкции, как и записывающая головка, но с бо́льшим числом витков в обмотке. Кроме того, в записывающей головке делают еще один, задний зазор магнитопровода. Он непосредственно не участвует в процессе записи, но предотвращает насыщение и остаточное намагничивание магнитопровода головки. В бытовых магнитофонах предпочитают обходиться одной универсальной головкой и для записи, и для воспроизведения. Когда намагниченная пленка с записью протягивается мимо зазора воспроизводящей головки, часть магнитного потока ответвляется в ее магнитопровод. Магнитный поток изменяется в такт с записанными звуковыми колебаниями, а поэтому в обмотке головки возникает ЭДС индукции. По закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости



Магнитный поток ленты и воспроизводящей головки

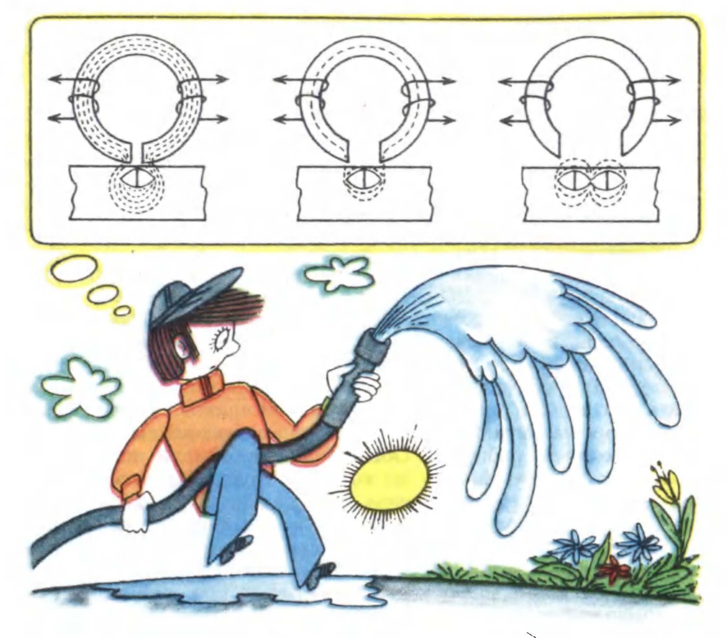
изменения магнитного потока. Поэтому чем быстрее протягивается пленка и чем выше частота записанных колебаний, тем больше ЭДС индукции.

Действительно, при равномерно намагниченной ленте магнитный поток в воспроизводящей головке не изменяется при движении ленты и ЭДС на ее выводах равняется нулю. Это соответствует нулевой частоте записанного сигнала. По мере повышения частоты записанного сигнала длина волны записи укорачивается и направление магнитного потока в головке все чаще изменяется на обратное, а следовательно, возрастает и скорость изменения потока, а с ним – и ЭДС на выводах головки.

Если бы зазор головки был бесконечно узким, мы получили бы линейную зависимость ЭДС индукции на выводах головки $U_{\text{воспр}}$ от частоты записанных колебаний. Но зазор нельзя сделать бесконечно узким. Во-первых, из механических соображений. В зазор между полюсами головки надо положить прокладку из твердого немагнитного материала, стачивающегося лентой примерно с той же скоростью, что и материал полюсных наконечников. Иначе зазор забьется ферромагнитной пылью от рабочего слоя ленты и головка вообще перестанет работать. Обычно для прокладки используют фосфористую бронзу, фольгу из которой трудно сделать тоньше нескольких микрометров. Впрочем, в последние годы разработаны головки с магнитопроводом из феррита. Зазором в них служит тонкий слой стекла. Эти материалы почти не подвержены абразивному действию магнитной ленты, поэтому стеклоферритовая головка служит гораздо дольше обычной. Во-вторых, при слишком узком зазоре уменьшится магнитный поток, ответвляющийся в магнитопровод, и уменьшится отдача головки. Следовательно, зазор имеет конечную толщину – несколько микрометров. Но как только при повышении частоты записанных колебаний на ширине зазора уложится более полуволны этих колебаний, ЭДС головки перестанет расти. А как только на ширине зазора уложится целая волна, т.е. один период колебаний, ЭДС головки упадет до нуля. Есть, правда, еще несколько максимумов отдачи головки, когда на длине зазора укладывается 3, 5, 7, ... или большее нечетное число полуволн записанного сигнала. Но практической пользы от этих максимумов нет, поскольку получить воспроизведение с приемлемым качеством при такой изрезанной, с нулями и максимумами, частотной характеристике просто нельзя.

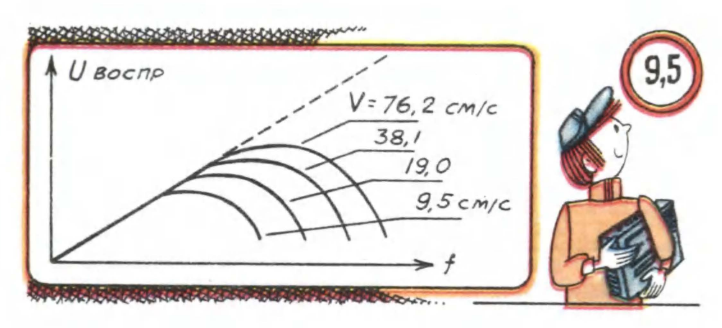


Амплитудно-частотная характеристика головки с бесконечно узким зазором

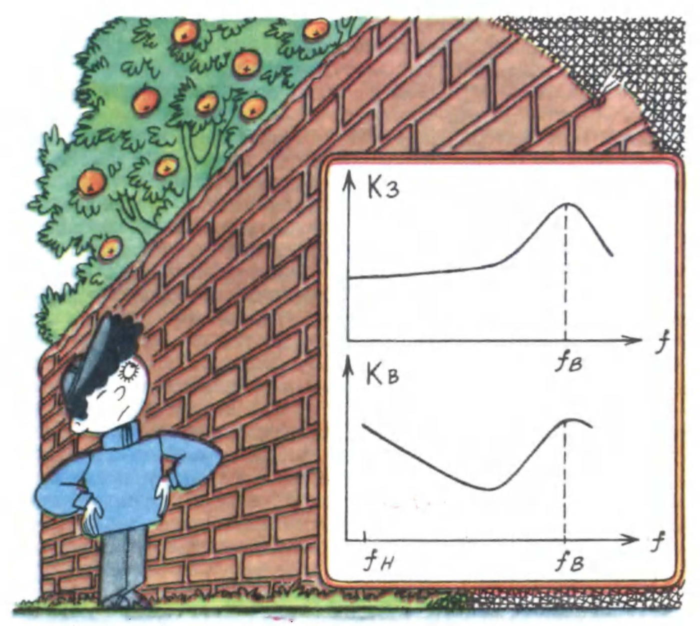


Изменение магнитного потока головки при увеличении ширины ее зазора

Итак, мы имеем частотную характеристику воспроизведения сигналов с магнитной ленты. Как видим, она очень неравномерна. Со стороны низких частот диапазон ограничен линейным спадом (на низких частотах длина волны на ленте велика, поэтому скорость изменения магнитного потока в головке и ее ЭДС получаются малыми), а со стороны высоких частот – спадом, обусловленным



Вид амплитудно-частотной характеристики головки при разной скорости движения носителя



Амплитудно-частотная характеристика каналов записи и воспроизведения

конечной шириной зазора головки. Как часто случается в радиотехнике, приходится выбирать некоторый оптимум и так подбирать параметры ленты, толщину зазора и скорость протяжки, чтобы получать приемлемый частотный диапазон. Собственно, последние 20 лет в магнитной записи и решались преимущественно эти проблемы. Результаты достигнуты неплохие. Например, при скорости ленты 4,75 см/с на портативном кассетном магнитофоне хорошего качества удается записать диапазон звуковых частот 40 Гц ... ...12,5 кГц.

Разумеется, это невозможно было бы сделать без коррекции частотной характеристики усилителей как при записи, так и при воспроизведении. При записи в усилителе искусственно поднимают верхние звуковые частоты и тем самым компенсируют эффект саморазмагничивания ленты и частично – влияние конечной ширины зазора. При воспроизведении характеристику усилителя корректируют еще больше. Во-первых, поднимают нижние частоты, чтобы скомпенсировать падение ЭДС головки на этих частотах. Во-вторых, снова поднимают верхние частоты, чтобы скомпенсировать влияние ширины зазора головки. В результате стольких усилий получают примерно равномерную частотную характеристику сквозного канала – от входа усилителя при записи до выхода усилителя при воспроизведении.

Но частотный диапазон канала записи-воспроизведения еще далеко не полностью определяет качественные показатели магнитофона. Нелинейные искажения (соответствие формы воспроизводимо-

го сигнала форме записываемого) – еще один важный фактор. Сейчас научились делать очень хорошие электрические усилители – они вносят нелинейные искажения менее сотых долей процента. Остаются искажения сигнала от пленки. Их с очень большим трудом удается снизить до десятых долей процента. Здесь играет роль и качество ферромагнитного материала головок и правильный выбор частоты и амплитуды тока подмагничивания. Еще один важный параметр – отношение сигнал-шум. Шум, прослушиваемый в паузах записи, складывается из двух компонент: собственного шума очень чувствительного усилителя воспроизведения и шума размагниченной ленты. Для снижения первой компоненты применяют специальные малошумящие транзисторы и тщательно согласовывают входные цепи усилителя с магнитной головкой, чтобы получить максимальную отдачу сигнала в усилитель. У хорошего магнитофона практически весь шум в паузах определяется шумом ленты.

Если вы хотите проверить свой магнитофон, поставьте кассету, на которой запись начинается не с самого начала ленты, прибавьте громкость и послушайте. Пока мимо головки движется ракорда, вы будете слышать только шум усилителя. Когда мимо головки будет протягиваться размагниченная лента, шум возрастет. Затем шум еще повысится – это начало записи. Добавится шум усилителя записи, микрофона или другого аппарата, с которого производилась запись. И наконец, появится звук записанной программы. Отношение сигнал-шум обычно определяют в децибелах по формуле

$$N = 20 \lg \frac{U_{\text{смакс}}}{U_{\text{ш}}},$$

где $U_{\text{смакс}}$ – максимальное напряжение воспроизводимого сигнала; $U_{\text{ш}}$ – напряжение шума при протягивании размагниченной ленты.

Оба напряжения измеряют на выходах усилителя воспроизведения при одном и том же положении ручек регулятора громкости и тембра. У хороших бытовых магнитофонов отношения сигнал-шум достигает 50...60 дБ. У студийных магнитофонов оно выше. Для субъективной оценки заметим, что разность в 50 дБ – это разность между сигналом, который «слышен довольно громко», и сигналом, который «почти не слышен».

Наконец, нельзя не упомянуть еще о нескольких параметрах магнитофона, целиком определяемых качеством лентопротяжного механизма. Сюда относятся стабильность скорости движения ленты, дополнительный шум и «рокот», создаваемые двигателем и другими вращающимися деталями. Эти помехи могут попадать в тракт воспроизведения как электрическим путем (электрические и магнитные наводки), так и чисто механическим. Последний, наверно, нуждается в разъяснении. Легонько стукните по воспроизводящей головке магнитофона, включенного в режим воспроизведения, каким-либо предметом. В громкоговорителе возникнет звук – это так называемый микрофонный эффект. Малейшие колебания витков обмотки, да и самой головки в магнитном поле, деталей механизма, имеющих остаточную намагниченность, приводят к возникновению ЭДС индукции, оказывающейся в данном случае помехой. Кроме правильного проектирования (оно уже определено заводской конструкцией) важно размагнитить все детали лентопротяжного механизма и сердечники головок. Как это сделать, описано в специальной литературе по магнитофонам. Секретов тут нет. Достаточно взять катушку с железным сердечником, пропустить через нее достаточно большой ток от сети, медленно поднести катушку к

лентопротяжному механизму, «поводить» над ним катушкой и также медленно отнести в сторону. Процессы, которые при этом произойдут, совершенно аналогичны процессам стирания записи с магнитной ленты высокочастотным полем.

О лентопротяжном механизме магнитофона можно рассказывать много, но, поскольку этот вопрос относится, скорее, к области механики, нежели радиоэлектроники, мы ограничимся лишь кратким описанием. Лента приводится в движение ведущим валом с обрезиненным прижимным роликом. Приемная катушка, или бобышка, в кассете подматывает ленту, создавая некоторое натяжение ее на выходе ведущего вала. Поскольку диаметр рулона ленты изменяется, подмотку осуществляют через фрикцион. Прижимается лента к головкам теперь чаще всего не за счет натяжения ленты, а примитивной фетровой подушечкой на плоской пружинке. Хорошую стабильность скорости ленты и малые детонации обеспечивает маховик, насаженный на ведущий вал. Такая конструкция лентопротяжного механизма выработалась за годы и годы экспериментов в области магнитной записи и пока представляется наилучшим решением.

Но неужели оно последнее в области техники магнитной записи? Наверное, нет. Совсем недавно появились крошечные микрокассеты, открыв дорогу производству карманных магнитофонов и магнитол. С микрокассетой удалось встроить магнитофон даже в рукоятку телефонной трубки! В то же время выпускаются и кассеты сравнительно больших размеров с широкой лентой. Это видеокассеты для видеомагнитофонов – одного из последних достижений техники магнитной записи.

Бытовые радиокомплексы и электроакустика

Если у вас нет видеомагнитофона, то прочей радиоаппаратуры обычно набирается немало. Это – радиоприемник, телевизор, проигрыватель и магнитофон. Среди них только телевизор стоит несколько особняком, а все остальные устройства имеют одинаковые выходы – усилители и громкоговорители. Напрашивается мысль о радиокомплексе. Ведь действительно нет никакого смысла иметь отдельные выходные устройства для каждого из приборов. За ту же стоимость можно получить единый усилитель с акустическими колонками значительно более высокого класса. Так и поступают. Основу радиокомплекса составляют усилитель со многими переключаемыми входами и громкоговорители. Иногда универсальный усилитель сокращенно называют УКУ – усилительно-коммутационное устройство.

Радиокомплекс легко наращивать. Приобретя сначала усилитель с колонками, вы можете подключить его, например, к трансляционной радиосети. Но такое решение вряд ли доставит удовольствие. Зато, если усилитель достаточно высокого качества, вы усвоите одну очень простую истину: весь радиокомплекс работает не лучше, чем самый плохой его элемент. Послушав работу усилителя, Вы снова подключите к трансляционной сети «динамик», висящий на кухне, и поедете присматривать проигрыватель или магнитофон. Выбор значительно облегчается благодаря разделению аппаратуры на классы. Проигрыватель второго класса «Аккорд» нет никакого смысла подключать к усилителю высшего класса «Радиотехника 001». И наоборот, если у вас уже есть усилитель и колонки относительно невысокого класса, бесполезно приобретать дорогой и

высококачественный проигрыватель. Часто радиоаппаратура выпускается подобранной в комплексы различного класса.

Мы уже обсудили возможности улучшения качества проигрывателей и магнитофонов. Пора перейти к оконечным устройствам радиокомплекса. Прежде всего надо заметить, что электроника в вопросах повышения качества продвинулась гораздо дальше смежных областей техники. Действительно, качественные показатели проигрывателей и магнитофонов определяются главным образом их механической частью, качеством грампластинки или ленты. Предварительные усилители электрических сигналов, вмонтированные в эти устройства, практически не вносят искажений. То же относится и к оконечным усилителям. Современные усилители мощностью несколько десятков ватт вносят нелинейные искажения в сотые доли процента и имеют практически равномерную частотную характеристику в диапазоне звуковых частот 20 Гц ... 20 кГц, т. е. практически во всем диапазоне частот, слышимых человеческим ухом. Все чаще подобные усилители оформляются в виде одной интегральной микросхемы и кроме обычных выводов оснащаются крепежным винтом или металлической пластиной для крепления на радиаторе с целью отвода тепла от мощных оконечных транзисторов микросхемы. Электрическая схема устройства получается предельно простой: два интегральных усилителя для двух стереоканалов да несколько навесных деталей – вот и все.

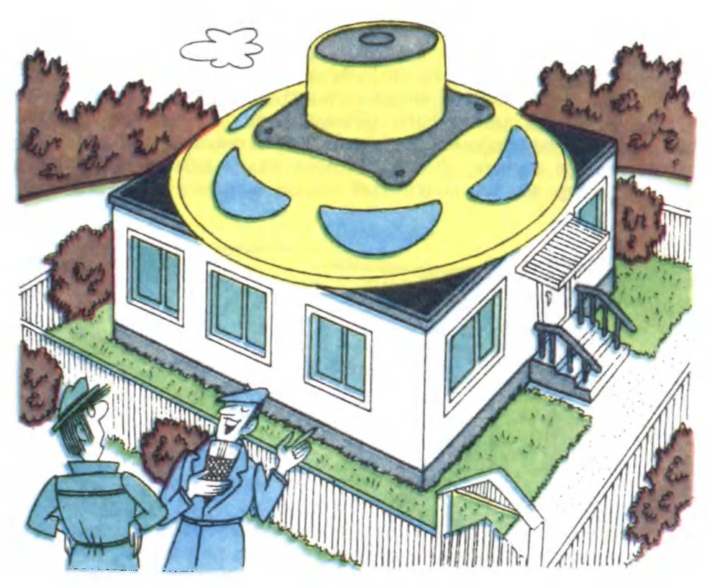
К сожалению, такими же успехами пока не может похвастаться электроакустика. И это не случайно. Спроектировать хорошую акустическую систему – очень сложная задача, связанная со многими чисто физическими ограничениями. Главной проблемой обычно является воспроизведение наинизших частот звукового спектра. На этих частотах громкоговоритель должен излучать довольно длинные звуковые волны. Длину звуковой волны можно рассчитать по обычной формуле $\lambda = v/f$, где v – скорость звука в воздухе, равная 330 м/с, а f – частота звуковых колебаний. Если на частоте 300 Гц длина звуковой волны чуть больше метра, то на частоте 30 Гц она составляет уже 11 м! Чем же это плохо? А вот чем. Устройство обычной динамической головки громкоговорителя вы наверняка знаете. Имеется звуковая катушка, скрепленная с диффузором и помещенная в поле сильного постоянного магнита. Когда по катушке проходит ток звуковой частоты, возникает сила Ампера, заставляющая двигаться катушку и диффузор. Двигаясь вперед, диффузор создает волну сжатия. Но в то же самое время на задней стороне диффузора возникает волна разрежения, и если скорость движения диффузора невелика, то воздух просто перетекает от передней стороны диффузора к задней, не создавая звуковой волны в окружающем пространстве.

Самый простой способ улучшить воспроизведение низших частот – поместить головку на акустический экран больших размеров. Раньше такой экран называли «отражательной доской», подчеркивая этим тот факт, что экран, да и весь корпус громкоговорителя изготавливали из деревянных досок. Сейчас для этой цели чаще используют древесно-стружечные плиты. Экран эффективно действует до тех пор, пока расстояние от передней стороны диффузора до задней, измеренное в обход края экрана, будет больше половины длины звуковой волны. Итак, для воспроизведения частоты 30 Гц нужен экран со стороной 5,5 м!

Как же быть? Неприемлемый из бытовых соображений, но вполне разумный с физической точки зрения выход заключается в следующем: вы сверлите круглую дыру в стене, разделяющей две



Устройство и внешнее оформление динамической головки громкоговорителя:
1 – магнит; 2 – звуковая катушка; 3 – керн; 4 – центрирующая шайба; 5 – диффузор; 6 – диффузодержатель; 7 – отражательная доска



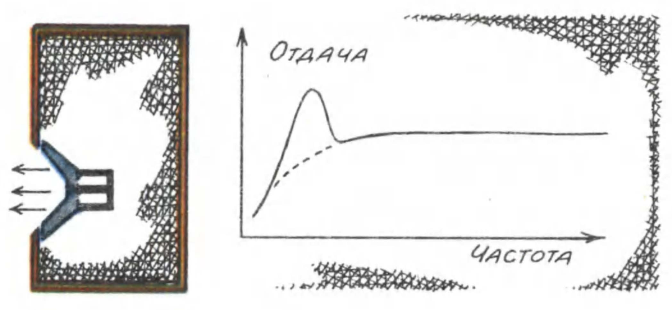
«Возможный» вариант акустической системы

комнаты и вставляете в нее динамическую головку. Стена служит акустическим экраном. А вот решение, предложенное одним американским радиолюбителем; я видел этот рисунок в старом журнале. Автор приглашает в гости (наверное, на прослушивание) приятеля и обещает: «Боб, ты не слышал Hi–Fi, пока не слышал моего!». Кстати, тут следовало бы объяснить этот, получивший широкое распространение термин «Hi–Fi» (начальные буквы английских слов high fidelity – высокое качество, высокая верность воспроизведения звука).

Но, оставив полушутливые решения, как же все-таки добиться воспроизведения низших частот из корпуса громкоговорителя, ограниченного по размерам? Сначала шли на компромисс и корпус делали побольше, а те низкие частоты, которые все-таки воспроизводились плохо, как говорят, «заваливались» громкоговорителем, искусственно «поднимали» в усилителе звуковой частоты. Так удавалось понизить диапазон воспроизводимых частот до 100 и даже 60 Гц. Более радикальное решение проблемы пришло в 60-х годах. А что если вообще устранить излучение задней стороны диффузора? Тогда не будет и акустического «короткого замыкания» на низших частотах. Сделали закрытый ящик и набили его звукопоглощающим материалом (хотя бы ватой). Результаты получились хорошие. Несмотря на то что КПД громкоговорителя упал вдвое, диапазон воспроизводимых частот расширился.

Теперь практически все акустические системы делают закрытыми. Иногда, правда, вводят еще трубку так называемого фазоинвертора. Длину ее подбирают так, чтобы объем воздуха в ящике и трубке резонировал на самой низшей частоте звукового диапазона. Тогда колебания воздуха на передней стороне и диффузора головки, и трубки получаются синфазными и складываются в излучаемой звуковой волне.

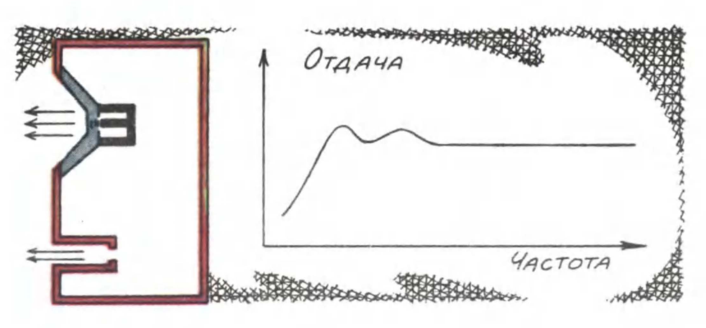
Специально для закрытых акустических систем были разработаны головки с очень мягким подвесом диффузора. Без закрытого корпуса такую головку вообще нельзя включать – ход диффузора при номинальной мощности получится чрезмерно большим, что приведет к ее поломке. Но когда головка установлена в закрытом корпусе, упругость замкнутого объема воздуха удерживает диффузор и не дает ему перемещаться с большой амплитудой. Но здесь возникает новое явление (уже знакомое нам) – явление резонанса. Диффузор, опираясь на замкнутый объем воздуха, ведет себя по-



Закрытая акустическая система и ее амплитудно-частотная характеристика (——— – без звукопоглощающего материала; — — — — со звукопоглотителем в корпусе)

добно грузику на пружинке: он может совершать затухающие колебания. Так же как и маятник, он обладает некоторой резонансной частотой и добротностью. Чем выше добротность колебательной системы, тем сильнее она подчеркивает частоты, совпадающие с резонансными или близкие к ним. У ящика небольших размеров резонансная частота попадает в область 100...200 Гц. На этих частотах появляется пик частотной характеристики громкоговорителя и звучание приобретает неприятный, «бубнящий» оттенок. Поэтому конструкторы акустических систем стремятся понизить резонансную частоту, сместив ее в ту область, где отдача громкоговорителя падает, в область десятков герц. Это можно сделать несколькими способами: увеличить объем корпуса, максимально уменьшить упругость подвеса диффузора, установить настроенную на частоту резонанса трубу фазоинвертора. Сделать резонансный пик менее острым и высоким можно, уменьшив добротность системы. Здесь помогает заполнение объема ящика звукопоглощающим материалом. Комплекс перечисленных мер позволяет создавать акустические системы с приемлемыми размерами и неплохими параметрами.

К другим факторам, определяющим качество звучания акустической системы, относятся нелинейные искажения и так называемые интермодуляционные искажения. И те и другие зависят главным образом от конструкции головок. Если в звуковую катушку подается синусоидальный ток, то это еще не значит, что излучаемое звуковое колебание будет синусоидальным. Чем жестче подвес диффузора, чем неоднороднее магнитное поле в зазоре магнитной системы, тем больше нелинейные искажения, вносимые головкой. Интермодуляционные искажения возникают тогда, когда в звуковой катушке текут одновременно токи нескольких звуковых частот. Представьте, например, такую ситуацию. Громкоговоритель воспроизводит одновременно низкий звук барабана и высокий звук скрипки. В момент, когда низкочастотное колебание проходит через нуль, звуковая катушка находится в нормальном положении и без искажений воспроизводит высокий тон. Но когда низкочастотное колебание проходит через максимум, звуковая катушка выдвигается из магнитного зазора, подвес диффузора напряжен и высокий тон воспроизводится уже совсем по-другому, с большими искажениями и меньшей громкостью. Таким образом, низкочастотные колебания диффузора как бы модулируют высокочастотные. Это и есть интермодуляционные искажения.



Фазоинвертор и его амплитудно-частотная характеристика

Создать головку, хорошо работающую во всем широком диапазоне звуковых частот,– очень сложная задача. Да и требования к подвижной системе головки при воспроизведении различных частот будут совершенно разными. На низких частотах диффузор должен двигаться как поршень и иметь большую площадь и мягкую подвеску. На высоких частотах, как показали исследования, вся площадь диффузора не участвует в колебательном движении, а работает только его центральная часть. Ведь длина высокочастотной волны очень мала – на частоте 12 кГц она не достигает и 3 см и поэтому просто не успевает пройти по всему радиусу диффузора. Для улучшения воспроизведения верхних частот центральную часть диффузора делают жесткой, пропитывая ее лаком, или вклеивая дополнительный жесткий маленький диффузор, или, что еще лучше, прикрепляя легкую и достаточно жесткую металлическую полусферу (купол). Головки с купольным диффузором хороши еще и тем, что имеют широкую диаграмму направленности на высоких частотах, что благоприятно сказывается на качестве звучания. Но самое лучшее решение, которому и следуют в конструкциях высококачественных акустических систем,– это использовать для воспроизведения различных частотных участков звукового диапазона разные головки.

Простейшая двухполосная акустическая система содержит две головки: одну для воспроизведения низких и средних частот, а другую – высоких. Низкочастотная головка имеет большой диффузор и мягкую подвеску, а высокочастотная – маленький жесткий купол вместо диффузора. Еще совершеннее трехполосные акустические системы, где отдельные громкоговорители воспроизводят низкие, средние и высокие звуковые частоты. Благодаря значительному снижению интермодуляционных искажений (ведь сигналы с разными частотами подаются на разные головки) звук их отличается особой чистотой и «прозрачностью».

Но многополосная система не оправдывает надежд, если электрический звуковой сигнал перед подачей его на головки не разделять фильтрами. Весь диапазон звуковых частот делят фильтрами на три частотных поддиапазона, например: 40...400 Гц (выделяется фильтром нижних частот), 400...5000 Гц (фильтром средних частот) и 5000...20 000 Гц (фильтром верхних частот). Фильтры содержат катушки индуктивности и конденсаторы, причем для уменьшения искажений в катушках даже избегают применять ферромагнитные магнитопроводы. Важен вопрос и согласования фильтров по их фазовым характеристикам. Ведь надо, чтобы сигналы подавались на головки в одной и той же фазе, иначе головки будут звучать «в разнобой», что опять-таки приведет к искажению звука.

Кажется, я достаточно напугал вас, читатель, сложностью проблем, стоящих перед создателями электроакустической аппаратуры. А может быть, вы сами займетесь ее конструированием? Я до сих пор не могу забыть впечатления, которое произвел на меня обычный четырехваттный динамик, когда я закрыл им отверстие старого полиэтиленового ведра, а внутрь ведра затолкал еще обрезки поролона и старую зимнюю шапку (для звукопоглощения). Смею вас заверить, этот динамик никогда раньше, ни в каком акустическом оформлении так хорошо не звучал. К сожалению, он не звучал так и потом, когда, окрыленный успехом, я изготовил вполне приличный ящик, который можно было поставить в комнате. Вмонтировал туда динамик, и ... очень пожалел, что шапка и ведро были уже выброшены. Оставалось констатировать, что в электроакустике еще много неясных, а порой и вообще необъяснимых феноменов. А теперь ...

Попробуем заглянуть в будущее

Давайте попробуем, но как это сделать, если не предаваться безудержным фантазиям? Воспользуемся методом более или менее научного прогноза, прослеживая современные тенденции и экстраполируя их на будущее. Бытовая электроника непрерывно совершенствуется. Огромный прогресс заметен в области усилительной техники и акустических систем. Их качественные показатели неизмеримо выросли за последние двадцать – тридцать лет. Имеются сведения, например, о разработке усилителей с пиковой мощностью до 200...400 Вт и коэффициентом нелинейных искажений в тысячные доли процента. Многие удивляются: зачем нужна столь большая мощность, не озвучивать же такой мощностью жилую квартиру? В ней нельзя будет жить хозяевам, да и соседям придется трудно. Разумеется, в течение 99,9% времени такая мощность не нужна. Но речевые, а в особенности музыкальные программы очень далеки от синусоидального колебания постоянной амплитуды. Они часто носят импульсный, пиковый характер. Динамический диапазон звучания обычного оркестра достигает 70...90 дБ. Это значит, что мощность самого громкого звука (пиковая мощность) превосходит мощность самого тихого звука (лежащего на уровне шумов) на семь – девять порядков, т.е. в десять миллионов – миллиард раз! Предположим, что для воспроизведения самого тихого звука достаточна мощность 1 мВт, тогда для неискаженного воспроизведения самого громкого звука понадобится мощность не менее 10 кВт! Разумеется, так никто не делает, и полный динамический диапазон оркестра современные электроакустические системы не воспроизводят. Таким образом, большая выходная мощность усилителей нужна для уменьшения искажений на пиках громкости. Но установка мощного усилителя оправдана лишь в том случае, если акустическая система способна без искажений отработать большую пиковую мощность.

Теперь допустим, что высококачественные мощные усилители и акустические системы скоро станут широко распространенными. Что же дальше? Тормозом для дальнейшего повышения качества звуковоспроизведения окажутся источники звуковых программ – те же самые проигрыватели и магнитофоны. Для их совершенствования предлагается много технических решений, но аппараты при этом становятся уж очень сложными и дорогими, да к тому же и недостаточно надежными в эксплуатации. Это общие недостатки аналоговой техники. Выход один – переходить к цифровой записи звука. Мы уже обсуждали преимущество передачи телефонного разговора в цифровой форме: уровень помех и искажений резко снижается, сигнал не ухудшается от многочисленных ретрансляций или перезаписей. То же относится и к цифровой звукозаписи, только объем обрабатываемой информации здесь получается гораздо больше.

Для передачи звуков с динамическим диапазоном 90 дБ каждый отсчет сигнала должен квантоваться не менее чем на 30 000 уровней. Для передачи одного отсчета потребуется 15 бит информации ($2^{15} = 32\,768$). Отсчеты должны следовать с тактовой частотой, по крайней мере вдвое превышающей максимальную частоту звукового диапазона (вспомните теорему отсчетов). Подойдет значение 48 или 64 кГц. Тогда скорость поступления звуковой информации в цифре составит около 10^6 бит/с, или 1 Мбит/с. Полоса частот, занимаемая подобным цифровым сигналом, окажется шире 1 МГц. Для его

записи понадобится уже не обычный, а видеомагнитофон. Ну не совсем видео, но по параметрам приближающийся к видеомагнитофону. Зато цифровая запись позволит получить звук, практически неотличимый от естественного.

Кроме магнитной существуют и уже разрабатываются другие способы цифровой записи звука. Очень интересны, например, диски, на которые лазерным лучом записана цифровая информация. Высокая когерентность лазерного излучения позволяет получать чрезвычайно высокую плотность записи. Одна сторона диска может «звучать» до полутора часов. Работы ведутся и в области лазерной видеозаписи. Вот какие источники программ мы увидим в недалеком будущем.

Цифровых дисков еще нет у слушателей, но на студиях звукозаписи цифровая техника уже широко используется. Записываемый сигнал в этом случае сразу преобразуют в цифровую форму и лишь затем обрабатывают и редактируют. Большинство искажений, создаваемых обычными аналоговыми звукорежиссерскими устройствами, при этом устраняется. Резцом звукозаписывающего рекордера управляет теперь не усилитель аналогового сигнала, а цифровое устройство. Делает оно это гораздо точнее; в результате качество обычной аналоговой записи на пластинках существенно повышается. И для передачи записываемой программы на другой завод грампластинок теперь можно не посылать диск – матрицу, а передать по сети связи «пакет» чисел в виде электрических импульсов, записанных на магнитной ленте или магнитном диске. Такой вид передачи очень близок к обмену информацией между компьютерами. Но компьютер сначала запоминает получаемую информацию, а уж затем ее обрабатывает. А нельзя ли с помощью компьютерных устройств памяти запоминать и звук, преобразованный в поток цифровых сигналов? Конечно, можно, и первые шаги в этом направлении уже сделаны.

Когда я упомянул о телефонной трубке, в рукоятку которой встроен миниатюрный магнитофон, я не сказал о другой, конкурирующей разработке. Цель, собственно, была простая – необходимо было устройство, записывающее телефонные звонки в отсутствие абонента. Телефонный ответчик на базе магнитофона хорошо известен и уже далеко не новинка. А вот в той, другой разработке в телефонную трубку встроили аналого-цифровой преобразователь и полупроводниковое устройство памяти, хранящее полученную и преобразованную в цифровой код информацию. Хотя длительность записи получилась весьма небольшой, всего около 20 с, первый шаг сделан! Важным достоинством такого, чисто электрического способа звукозаписи является полный отказ от механики – в устройстве нет ни одной движущейся или вращающейся части. Развитие и дальнейшее усовершенствование этого способа звукозаписи (увеличение полосы частот и длительности записи) теперь уже дело технологии, а она, как показывает опыт, совершенствуется очень быстро, особенно в области полупроводниковой электроники. Как только появятся небольшие и дешевые устройства полупроводниковой памяти объемом в сотни мегабит, у проигрывателя и магнитофона будет очень сильный конкурент. Вот так вычислительная техника вторгается в совершенно неожиданные и, казалось бы, совсем несовместимые области техники. Есть и еще одно применение микроЭВМ.

На память приходит броский лозунг: «ЭВМ управляет бытовым радиокомплексом». Странно? До сих пор бытовым радиокомплексом управлял человек, слушатель или, как теперь все чаще говорят, пользователь. Давайте определим число органов управления сов-

ременным бытовым радиокомплексом. Тюнер: ручка настройки, переключатель диапазонов, ручка выбора полосы пропускания, переключатель «Местный – дальний прием», общий выключатель – итого пять органов управления. Примерно по стольку же, если не больше, органов управления и у других устройств, входящих в радиокомплекс. Всего набирается несколько десятков органов управления. Есть у вас гарантии, что все они установлены в оптимальные для данного режима работы и воспроизводимой программы положения? Наверное, нет, особенно если вы не слишком искушенный в радиотехнике человек. Радиовещательную программу вы можете слушать не на той волне, в то время как другая станция передает ее же с лучшим качеством и в условиях меньших помех; полосу пропускания вы наверняка выбрали неоптимальную; включая проигрыватель, забыли, что надо сделать прежде: пустить двигатель или поставить звукосниматель на пластинку, а уж выбор оптимального уровня записи в магнитофоне для вас вообще темный лес. Рядовой пользователь часто решает и более прозаические проблемы: подключив магнитофон к усилителю, долго не может понять, почему нет звука, когда кассета вертится, и пытается отрегулировать положение головки, хотя на самом деле он просто взял не тот соединительный кабель.

Все эти проблемы снимаются, если в радиокомплекс встроен микропроцессор, управляющий его работой. В этом случае управление комплексом больше напоминает работу с микрокалькулятором. Например, вы заказываете микропроцессору, чтобы во вторник вечером (укажите время) был записан концерт Раймонда Паулса (или кого-нибудь еще, кто вам больше нравится). Частота нужной станции внесена в память цифрового устройства настройки компьютера заранее, микропроцессору надо только указать ее код и время. Сделав «заказ», вы можете забыть о нем и во вторник вечером спать, гулять или засидеться на работе. Микропроцессор сам в нужное время включит нужные агрегаты (тюнер и магнитофон), сделает запись и все выключит. Придя домой или проснувшись, вы нажмете кнопку на клавиатуре процессора, он сделает необходимые переключения, и вы услышите любимые мелодии. А уж об установке полосы пропускания, регулировке тембра, громкости, баланса стереоканалов вам можно не заботиться – процессор сделает это сам, как всегда что-нибудь оптимизируя, например отношение сигнал-шум.

Сказка? Она вполне осуществима. Вся необходимая техника уже есть. А по мере усложнения управляющего компьютера возможности еще больше расширятся. Я не говорю о встроенных часах, календаре, программе передач, хранящейся в электронной памяти и беспроводном дистанционном управлении на ИК лучах. Все это уже есть и иногда используется. Возможно и голосовое управление компьютером. Сейчас современные компьютеры этому обучаются, распознать речь «хозяина» им уже не составляет труда. А когда компьютеры научатся исполнять и некорректно сформулированные задачи, возможно, будет, например, такое. Усевшись в кресло, вы объясняете компьютеру (который круглые сутки настороже!): «А поставь-ка мне, приятель, Пугачеву, ну, там, где она про лето поет...». И через несколько миллисекунд (компьютер «думает» и работает быстро) слышите голос певицы: «Лето, ах, лето...».

Пройдет еще какое-то время, компьютеры станут совсем умными, а дети в семье совсем избалованными обилием обслуживающей их техники, и тогда может случиться и такое. «Покажи-ка мне «Ну, погоди!» семьдесят третью серию», – скажет ребенок, устраиваясь

перед телевизором. «Ничего не выйдет, малыш,– ответит бытовой радиокомплекс,– у тебя еще не сделан английский». И немедленно изобразит на экране телевизора (он же дисплей) страницу учебника и прочитает ее с идеальным оксфордским произношением. Согласитесь, что ради создания таких умных и полезных радиокомплексов стоит работать! Но мы замечтались, а в радиоэлектронике еще столько вопросов, о которых не то что поговорить, а даже упомянуть мы еще не успели. Поэтому перевернем страницу и начнем следующую главу.

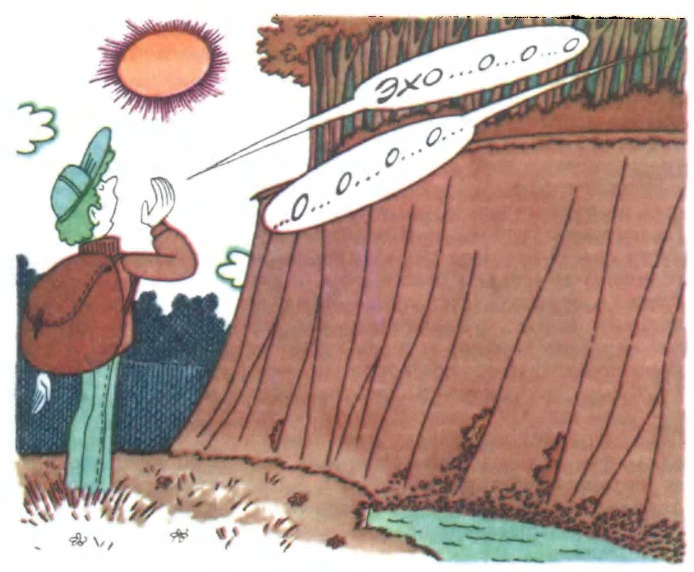
9. РАДИОЛОКАЦИЯ

Глава рассказывает о спрутах-звукоулавливателях, возникновении и развитии советской радиолокации, первых опытах по обнаружению самолетов с помощью радиоволн, гибели немецких и американских линкоров и многом другом, что может очень заинтересовать не только любителей военно-приключенческой литературы. В частности, посмотрим на арбуз с расстояния полутора тысяч километров, обсудим проблему небесных «ангелов», поговорим об обнаружении ливневых облаков и составлении подробных карт в плохую погоду.

Что такое радиолокация?

Когда вы стоите на краю обрыва, а перед вами, за рекой, стеной поднимается крутой берег, заросший густым лесом, трудно удержаться, чтобы не крикнуть или громко не хлопнуть в ладоши. В ответ раздается эхо. То что вы делаете, называется звуколокацией. Звук, отраженный от противоположного берега, запаздывает во времени и искажается, часть его накладывается на посылаемый звук, и начало фразы принять (услышать) уже нельзя, а конец фразы звучит вполне отчетливо. Налицо многие проблемы, встречающиеся в радиолокации.

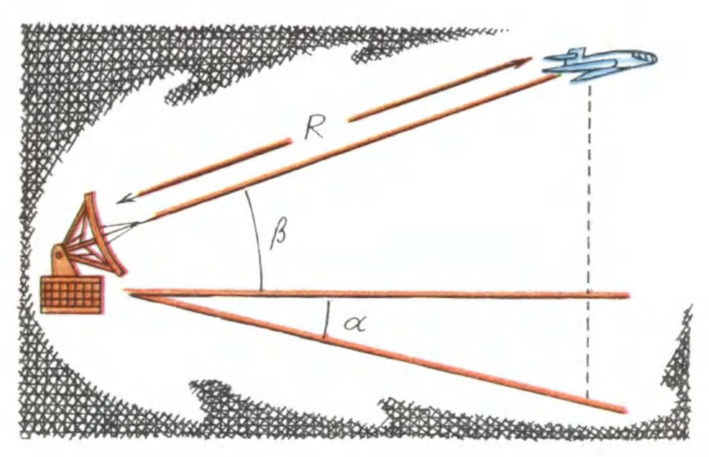
О принципах радиолокации вы, читатель, уже наверняка немало наслышаны. Мощный луч радиолокационного передатчика фокусируется большой антенной в направлении исследуемого объекта – цели, как говорят специалисты по радиолокации. Разумеется, это название пошло от военных, для которых, собственно, и создавались первые радиолокаторы. Теперь уже у радиолокатора (радара) появилась масса мирных профессий, о которых мы еще поговорим. Итак, «цель» облучена зондирующим сигналом (привыкайте к радиолокационной терминологии!). Целью может быть самолет, корабль, ракета, поверхность Земли или другой планеты. Радиоволны рассеиваются целью, а часть их приходит назад к радару, где и регистрируется приемником. Итак, первая задача радиолокации – обнаружение цели – решена. Вторая задача сложнее – надо определить координаты цели. На уроках физики и математики вас учили, что прежде, чем измерять координаты, надо задать систему координат. Разные радары работают в различных системах координат.



Звуколокация

Например, наземная радиолокационная станция (РЛС) наблюдения за воздушной обстановкой измеряет три координаты цели: азимут, угол места и наклонную дальность.

Без такой РЛС сейчас немыслим никакой аэродром. Работает эта станция в сферической системе координат. Угловые координаты определяют по положению антенны. Азимут отсчитывается от направления на север, угол места – от направления на горизонт.



Система координат обзорной РЛС:
α – азимут; β – угол места; R – наклонная дальность

Сразу становится ясно, что чем «тоньше» луч радара, т. е. чем у́же диаграмма направленности его антенны, тем точнее можно определить координаты цели.

Для слежения за целью антенну надо поворачивать. Различают два основных режима работы РЛС: режим обзора (сканирования) пространства и режим слежения за целью. В режиме обзора луч РЛС по строго определенной системе просматривает все пространство или заданный сектор. Антенна, например, может медленно поворачиваться по азимуту и в то же время быстро наклоняться вверх и вниз, сканируя по углу места. В режиме слежения антенна все время направлена на выбранную цель и специальные следящие системы поворачивают ее вслед за движущейся целью.

Третья координата – дальность – определяется по запаздыванию отраженного сигнала относительно излучаемого. Так и хочется сказать, что запаздывание сигнала очень мало, поскольку радиоволны распространяются со скоростью света, равной 300 000 км/с, или $3 \cdot 10^8$ м/с. Действительно, для самолета, находящегося на расстоянии 3 км от РЛС, запаздывание составит всего 20 мкс ($20 \cdot 10^{-6}$ с). Такой результат получился из-за того, что радиоволна проходит путь в обоих направлениях, к цели и обратно, так что общее расстояние, пройденное волной, составит 6 км. Но вот при радиолокации Марса, успешно проведенной в начале 60-х годов, задержка сигнала составила около 11 мин, а это время уж никак не назовешь малым!

И еще один аспект этой интереснейшей техники. Если посланный сигнал будет «путешествовать» в просторах космоса целых 11 мин, насколько же он ослабнет! И как выделить его в приемнике из собственных шумов приемника и шумов космического происхождения? Ослабление сигнала при радиолокации вполне поддается расчету, который основан на простых физических соображениях. Их мы уже рассматривали в гл. 4. Если в какой-то точке излучается мощность P, то поток мощности через единичную площадку, находящуюся на расстоянии R, будет пропорционален $P/4\pi R^2$. В знаменателе стоит площадь сферы радиусом R, окружающей источник. Таким образом, при обычной радиосвязи мощность, принятая нами, обратно пропорциональна квадрату расстояния. Этот закон – закон сферической расходимости пучка энергии – выполняется всегда при распространении волн в свободном пространстве. Даже если мы сконцентрируем излучаемую мощность в узкий луч и поток энергии возрастет в несколько раз (этот коэффициент называется коэффици-



Поток энергии через единичную площадку обратно пропорционален квадрату расстояния

ентом направленного действия антенны, сокращенно КНД), квадратичная зависимость от расстояния сохранится. В радиолокации дело обстоит значительно хуже. Облучаемая на расстоянии R цель сама рассеивает энергию по всем направлениям. И если облучающий цель поток энергии ослабевает обратно пропорционально R^2, то приходящий к приемнику рассеянный поток еще ослабляется во столько же раз и оказывается обратно пропорциональным R^4. Это означает, что для повышения дальности действия РЛС в 2 раза при прочих равных условиях мощность ее передатчика надо повысить в 16 раз. Вот какой дорогой ценой достигаются высокие характеристики современных РЛС!

Приведу несколько конкретных примеров. Возьмем небольшую аэродромную РЛС с антенной площадью 10 м^2. И пусть она наблюдает небольшой самолет с эффективной поверхностью рассеяния[1] 5 м^2 на длине волны 10 см. Работоспособность такой РЛС сейчас ни у кого не вызывает сомнений. Однако расчет показывает, что отраженный сигнал, приходящий в приемник при удалении самолета на 80 км, в этом случае на 16 порядков слабее излучаемого! Как говорят инженеры, потери сигнала при локации составляют 10^{-16}, или 160 дБ. Но их это не пугает. При излучаемой мощности 10 кВт чувствительность приемника должна составить 10^{-12} Вт. Такие приемники научились делать еще в годы второй мировой войны!

Другой пример. Заставим нашу РЛС осуществлять локацию Марса. Дело это, разумеется, совершенно безнадежное, если не принять специальных мер. Увеличим площадь антенны до 1000 м^2. И даже в этом случае потери сигнала на трассе составят 250 дБ, или 10^{25}. Понадобятся сверхмощный передатчик и особые методы приема сигналов, уровень которых лежит гораздо ниже уровня собственных шумов приемника. К одному из таких методов относится когерентное накопление сигнала. Сеансы локации проводятся много раз, и отраженные сигналы суммируются. Амплитуда суммарного сигнала после суммирования n посылок возрастает в n раз, тогда как амплитуда статистически независимых шумов – только в $\sqrt{n}$ раз. При достаточно длительном времени накопления удается выделить чрезвычайно слабые отраженные сигналы. В первых опытах по локации Марса время накопления составляло 8,5 ч.

Существует великое множество радиолокаторов. Это и только что упомянутый «планетный», представляющий собой уникальный комплекс сооружений со сверхмощными передатчиками и ЭВМ для обработки сигналов, увенчанный полноповоротной антенной – чашей диаметром 75 м (только представьте себе грандиозность этого сооружения!). Это и миниатюрный, почти карманный радар работника автомобильной инспекции, позволяющий в считанные секунды определить скорость движущегося по шоссе автомобиля. Радарами оснащены теперь все морские и речные суда, все самолеты. Жизнь и деятельность в самых отдаленных уголках страны даже трудно представить себе без радаров.

Когда во время экспедиции гидрографическое судно шестой день не выходило из тумана в районе Курильских островов и

---

[1] Эффективной поверхностью рассеяния называют площадь всенаправленного переизлучателя, создающего такой же отраженный сигнал, как и реальный объект.

Камчатки, я никак не мог понять, как же эти места осваивали и исследовали первопроходцы? Каждую ночь, каждый туманный день они должны были быть настороже – не послышится ли по носу судна плеск воды, накатывающейся на рифы. А в случае крушения помощи ждать неоткуда – места не заселены, а карт и лоций нет – именно первопроходцы их и составляли.

Теперь все не так. По ворсистой ковровой дорожке, идеально чистой на гидрографическом судне, ты идешь к навигаторам, и они покажут карту, где со скрупулезной точностью нанесены мели, берега и глубины. Покажут и экран РЛС кругового обзора, где электронный луч непрерывно рисует ту же карту, получаемую радаром в этот самый момент. Видим на ней и берега, и рифы, и проходящие мимо корабли. А окна рубки «занавешены» туманом, и не видно даже передней мачты. Этому чудо-прибору, радару, не более 50 лет.

Начало радиолокации

В 30-х годах нашего столетия сгущались тучи на политическом горизонте Европы, да и всего мира. Набирал силу и наглел фашизм в Германии, Италии, в Японии поговаривали о мировом господстве. Страны оси Рим – Берлин – Токио лихорадочно вооружались. Росли скорости, вооруженность и дальность полета самолетов. Появилась настоятельная необходимость в обнаружении и определении координат воздушных целей. Но как это сделать? Имевшаяся в это время звуколокационная техника уже не могла работать удовлетворительно. Тем не менее звукоулавливатели разрабатывались, и на октябрьских парадах возили по Красной площади похожие на спрутов установки с черными рупорами и переплетением трубок. «Слухач» звукоулавливателя наводил рупоры в направлении места, откуда исходил звук от летящего самолета. Но скоростной самолет улетал в это время далеко... К тому же звук «относился» ветром. А обычные методы визуального наблюдения оказывались бесполезными, как только самолет скрывался за облаками. Прожекторы да звукоулавливатели – вот и вся техника, которая была в распоряжении военных к середине 30-х годов.

И военные выступили с инициативой создать новые средства использующие другие виды излучений, главным образом электромагнитные волны. Инициаторами исследований были представитель Главного артиллерийского управления (ГАУ) РККА М. М. Лобанов, впоследствии генерал-лейтенант, и представитель управления ПВО РККА П. К. Ощепков, впоследствии профессор, директор Института интроскопии. В Центральной радиолаборатории (ЦРЛ) организовалась группа под руководством старшего инженера Ю. К. Коровина. Договор между ЦРЛ и ГАУ был заключен в октябре 1933 года. Кстати, этот договор был первым в СССР юридическим документом, положившим начало планомерным научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам в области радиолокации, а также их финансированию. В Соединенных Штатах по настоянию вице-адмирала Боуэна лишь в 1935 году конгресс ассигновал Морской исследовательской лаборатории 100 000 долларов специально на работы в области радиолокации. А первый контракт с промышленностью на постройку шести опытных станций был заключен в 1939 году.

Официальная западная история родиной радара считает Великобританию. Сейчас трудно винить историков за эту неточность, ведь

все работы по радиолокации и у нас, и за рубежом по понятным причинам проводились в обстановке строжайшей секретности. Перед второй мировой войной Великобритания располагала самым большим в Европе военно-морским флотом, но Германия имела подавляющее превосходство в воздухе. Поэтому защита от воздушного нападения (немцы неоднократно бомбили Лондон) была для англичан жизненно важной задачей. С 1936 года вдоль побережья Великобритании стали строить линию постов раннего радиолокационного обнаружения, к началу войны она была закончена.

Идея радиолокации в те годы буквально носилась в воздухе. Впервые ее высказал П. К. Ощепков еще в 1932 году. Позднее он же предложил идею импульсного излучения. Любопытно, что спустя два года в Ленинградский электрофизический институт (ЛЭФИ) как-то пришел командир зенитной батареи с предложением использовать для обнаружения самолетов радиоволны. Он не знал, что подобные работы уже ведутся.

16 января 1934 года в Ленинградском физико-техническом институте (ЛФТИ) под председательством академика А. Ф. Иоффе состоялось совещание, на котором представители ПВО РККА, в числе которых был и П. К. Ощепков, поставили задачу обнаружения самолетов на высотах до 10 и дальности до 50 км в любое время суток и в любых погодных условиях. В протоколе совещания, в частности, говорилось: «При этом должны быть разработаны относительно достаточно мощные генераторы дециметровых и сантиметровых волн, направляющие электромагнитные излучения системы, а также приемные устройства, обеспечивающие по отраженному электромагнитному лучу определение местонахождения самолетов (их координаты), их количества, курс движения и скорости». Согласитесь, что задачи радиолокации были сформулированы предельно точно, но техники еще не было. За работу взялись несколько групп изобретателей и ученых. В ЛЭФИ группа энтузиастов (Б. К. Шембель, В. В. Цимбалин и др.) использовала метод непрерывного излучения радиоволн. Приемник и передатчик располагались раздельно. К приемнику поступали два сигнала: один непосредственно от передатчика, а другой – отраженный от самолета. Поскольку дальность до самолета все время изменялась, набегала и фаза отраженной волны. Она то складывалась, то вычиталась с волной, приходящей непосредственно от передатчика. Возникала интерференция волн, вызывающая характерные биения, слышимые в телефонных наушниках, присоединенных к выходу приемника. Первые опыты проводились в Ленинграде, а уже летом 1934 года опытную установку показывали в Москве членам правительства. Передатчик был установлен на верхнем этаже дома № 14 по Красноказарменной улице, а приемник располагался в районе пос. Новогиреево по шоссе Энтузиастов, сразу же за Измайловским парком. На лесную поляну приехали маршал М. Н. Тухачевский, Н. Н. Нагорный, впоследствии командующий ПВО страны, академик М. В. Шулейкин и другие. Аппаратуру показывал энтузиаст радиолокации представитель УПВО П. К. Ощепков. Самолет, специально летавший в районе расположения аппаратуры, обнаруживался уверенно. Эта аппаратура работала на метровых волнах с использованием дипольных антенн. Диаграммы направленности их были широкими, и координаты самолета определялись лишь весьма приблизительно.

Неясных вопросов было очень много. Никто не знал, как отражаются радиоволны. Ведь до той поры имелись сведения лишь о «затенении» радиотрассы, обнаруженном еще А. С. Поповым: когда между двумя кораблями, осуществлявшими радиосвязь, про-

9–647

ходил третий, связь нарушалась. Было известно об опытах американцев А. Тейло́ра и Л. Юнга, наблюдавших отражения радиоволн. И это все. Поэтому неудивительно встретить в отчете ЦРЛ, например, такие строки: «Отражающее зеркало не из металла, а из фанеры дает отражение примерно в четыре–пять раз меньше, чем металлические». Исследовали разные конструкции антенн, генераторных ламп, разные схемы приема, зависимость отражения от положения и типа самолета, от его высоты. Нелегким трудом добывались знания и опыт. Случались и неожиданные открытия.

В 1936 году в Евпатории группа Б.К. Шембеля испытывала новый радиопеленгатор «Буря». Он работал уже на дециметровых волнах длиной 21...23 см. Передатчик непрерывного излучения был выполнен на совершенно новом по тому времени электровакуумном приборе – магнетроне. Две параболические антенны (одна для передачи, другая для приема) устанавливались на поворотном устройстве снятого с вооружения звукоулавливателя. Вся аппаратура вместе с батареями и аккумуляторами размещалась на автомобильном прицепе. Пеленгатор успешно обнаруживал самолеты на расстоянии около 10 км. При этом в телефонах был слышен достаточно низкий звук биений, соответствующий доплеровской частоте. Но вот операторы отметили своеобразный свистящий звук, напоминающий щебетание ласточки. Звук появлялся только при ориентации антенны на юго-восток, где никаких видимых целей не было. Кроме того, звук появлялся при вибрации установки, хотя бы небольшой. Оказалось, что вибрация элементов генератора приводила к небольшой частотной модуляции его колебаний. Частотно-модулированные колебания, отраженные от неподвижного объекта, создавали биения в приемнике. Но что могло отражать радиоволны? Частота биений была так высока, что отражение было возможно лишь от очень удаленного объекта. Взгляд на карту прояснил дело. Радиоволны отражались от горных вершин Ай–Петри и Роман-Кош, возвышавшихся над горизонтом и видимых только в исключительно хорошую погоду. Расстояние до вершин было около 100 км. Так, хотя и случайно, РЛС непрерывного излучения с частотной модуляцией впервые осуществила локацию очень удаленных неподвижных объектов.

Особый успех выпал на долю группы, разрабатывавшей в ЛФТИ макет импульсного радиолокатора. В 1938 году макет был испытан и показал дальность действия до 50 км по самолету, летевшему на высоте 1,5 км. Создатели макета Ю.Б. Кобзарев, П.А. Погорелко и Н.Я. Чернецов в 1941 году за разработку радиолокационной техники были удостоены Государственной премии СССР.

Юрий Борисович Кобзарев, ныне академик, рассказывает: «Редуты» – станции нового типа для обнаружения самолетов – были построены на принципе импульсного излучения радиоволн. До этого в подобных установках использовалось непрерывное излучение. Применяя же импульсный метод, мы рассчитывали, что удастся обнаруживать самолеты на больших расстояниях. В основу «редутов» легли работы, проводившиеся в Опытном секторе ПВО под руководством П.К. Ощепкова и в организованной в 1935 году Д.А. Рожанским лаборатории ЛФТИ».

Передатчик радиолокатора был собран на лампе ИГ-8, специально разработанной для этой цели В.В. Цимбалиным. Он имел мощность 40...50 кВт в импульсе при анодном напряжении около 20 кВ и работал на метровых волнах. Размещался передатчик в автофургоне, а на крыше фургона возвышалась антенна типа «Уда-

Яги» с пятью директорами и тремя рефлекторами, укрепленными на мачте высотой 12 м. В другом автофургоне размещался приемник с точно такой же антенной.

Название антенны требует небольших пояснений. Она была изобретена японским профессором Хидетсугу Яги и описана его коллегой, профессором Уда, в специализированном японском журнале в марте 1926 года. В то время специалисты всего мира читали японские технические журналы, написанные иероглифами, не чаще, чем мы с вами, и названная публикация прошла незамеченной. Профессор Уда повторил публикацию спустя два года, но уже на английском языке и в американском журнале. Антенна сразу получила признание и стала широко использоваться благодаря простоте конструкции и высокой эффективности. Все ее элементы размещены на несущей траверсе. Кроме обычного полуволнового диполя, соединенного с фидером, она содержит пассивные вибраторы-рефлекторы, находящиеся позади активного вибратора-диполя, и директоры, направляющие излучение вперед. Теперь антенны этого типа называют «волновой канал», они широко используются для приема телевидения, и их можно увидеть на крыше почти каждого дома.

Третий автофургон содержал агрегаты питания всей станции, получившей название «Редут». После всесторонних испытаний и усовершенствований станция «Редут» была принята летом 1940 года на вооружение войск ПВО под названием РУС-2. Небезынтересна история этого названия. Расшифровывается оно так:«Радиоулавитель самолетов», а предложил его нарком обороны К. Е. Ворошилов, когда познакомился с первыми макетами станций непрывного излучения.

Станции РУС-2 сослужили хорошую службу с самого начала Великой Отечественной войны. Они своевременно помогли обнаружить армаду немецких самолетов (до 250 единиц), направлявшихся поздним вечером 21 июля 1941 года бомбить Москву. Сквозь заслон заградительного огня зенитной артиллерии к Москве прорвалось лишь несколько бомбардировщиков. Станции вели непрерывную воздушную разведку в осажденных Ленинграде и Севастополе, в Мурманске и на других важных участках фронта. Там, где использовались РЛС, отменялись дежурные вылеты истребителей – они поднимались в воздух лишь при появлении вражеских самолетов.

Станции РУС-2 непрерывно совершенствовались. Уже в конце 1941 года была решена проблема защиты приемника от мощных импульсов собственного передатчика и станция стала выпускаться в одноантенном варианте. По сравнению с аналогичными станциями, разработанными в США, Великобритании и Германии, наша станция весила почти в три раза меньше и в шесть раз быстрее разворачивалась из походного состояния в рабочее.

В течение всей войны велась очень интенсивная работа по увеличению дальности действия и точности определения координат с помощью РЛС. Станция РУС-2 и подобные не могли обеспечить высокую точность определения координат, поскольку работали на достаточно длинных волнах (4 м) и имели широкую диаграмму направленности антенн. Для ее сужения необходимо было перейти на более короткие волны, ведь угловая ширина φ главного лепестка диаграммы направленности определяется отношением длины волны к размеру антенны: $\varphi = \lambda/D$. И сверхвысокочастотная техника быстро развивалась: разрабатывались магнетронные генераторы, волноводная техника, более совершенные и чувствительные супергетеродинные приемники. Во время войны появились станции орудийной наводки (СОН) с параболическими зеркальными антеннами.

А в конце 1942 года РЛС удалось поставить на двухместный самолет Пе-2. Впоследствии эти станции назывались ПНБ (прицел наведения бомбардировщика).

Как развивалась радиолокация у наших союзников? Англичане к 1941 году не только имели сеть РЛС вдоль юго-восточного побережья, но и устанавливали радиолокаторы на кораблях. 27 мая 1941 года после семидневной «охоты» англичане потопили лучший корабль германского флота – линкор «Бисмарк» водоизмещением 35 000 тонн. В преследовании линкора принимали участие авианосец, несколько линейных кораблей, крейсеров и эскадренных миноносцев. Наведение английской эскадры осуществлялось по данным РЛС. Нет никакого сомнения, что, не будь у англичан радара, немецкому линкору удалось бы скрыться в условиях плохой погоды и бурного моря. Потопление «Бисмарка» не обошлось для Англии без потерь. Погиб самый крупный и быстроходный в эскадре линейный крейсер «Худ». Он раскололся надвое после пятого залпа орудий главного калибра «Бисмарка», серьезное повреждение получил крейсер «Принц Уэльский».

Любопытно, насколько усовершенствовалась морская радиолокация за последующие два года. 26 декабря 1943 года другой немецкий линкор «Шарнхорст» дерзко напал в Баренцевом море на конвой судов, следовавших в Советский Союз. Несколько юго-западнее конвоя находилась эскадра главнокомандующего английским флотом адмирала Фрэзера. Он заранее вышел на перехват, получив сведения разведки, что «Шарнхорст» покинул свою базу в Альтен-фьорде в Норвегии. РЛС крейсера сопровождения «Белфаст» обнаружила фашистского пирата на расстоянии 17,5 миль, что дало возможность конвою судов приготовиться к отражению нападения. Завязался бой. Исход его решила подоспевшая эскадра адмирала Фрэзера. Вот как описывает это М. М. Лобанов в книге «Из прошлого радиолокации»: «В полной темноте флагманский линкор Фрэзера «Герцог Йоркский» с помощью РЛС обнаружил «Шарнхорст» на дистанции около 23 миль. Приблизившись до 6 миль, он открыл по нему артиллерийский огонь. В условиях полярной ночи стрельба велась по данным РЛС. Затем английские эсминцы и крейсера атаковали и торпедировали «Шарнхорст». Торпедирование корабля было для него смертельно, и около 21 часа 30 минут он затонул. Из всего экипажа было спасено только несколько человек». Итак, в 1943 году РЛС позволяли уже вести прицельный артиллерийский огонь. А к концу войны точность радаров возросла настолько, что были случаи радиолокационного обнаружения перископов подводных лодок.

Интенсивное развитие радиолокационной техники в Соединенных Штатах Америки началось с трагедии. В 1941 году американский флот на Тихом океане базировался в Перл Харборе (Жемчужная Гавань). Это военно-морская база, расположенная вблизи Гонолулу, на острове Оаху, входящем в архипелаг Гавайских островов, благодаря военной мощи и числу боевых кораблей считалась неприступной твердыней. Соединенные Штаты Америки пока еще не вступили во вторую мировую войну.

В глубокой тайне, прикрываясь лицемерными улыбками и лживыми дипломатическими переговорами, японские милитаристы разрабатывали план операции, позволявшей им одним ударом покончить с американским флотом и добиться господства на Тихом океане. В потаенную гавань на острове Итуруп (Курильские острова) стягивалась эскадра. Командующий японским флотом И. Ямамото строжайше запретил всякие радиопереговоры в эфире. Более того,

радиопередачи каждого ушедшего из Японии корабля имитировались береговыми радиостанциями, чтобы ни один радист ничего не заподозрил. В ночь на 26 ноября 1941 года адмирал Нагумо вывел эскадру, держась далеко от обычных судоходных путей. Ночью 7 декабря она оказалась к северу от Гавайских островов. В состав эскадры входило шесть авианосцев с 360 самолетами, два линкора, три крейсера, девять эсминцев и шесть подводных лодок.

Гавайские острова были наводнены японскими шпионами, дислокация американских кораблей и система обороны военно-морской базы были хорошо известны. Этой роковой ночью Нагумо получил последние донесения: никаких следов тревоги у американцев не наблюдалось. Радиостанция Гонолулу с утра передавала веселую музыку и послужила отличным приводным радиомаяком для японских самолетов. На рассвете 7 декабря 1941 года с палуб японских авианосцев поднялись 360 бомбардировщиков с полным запасом бомб и двумя группами легли на курс к острову Оаху.

На острове имелась единственная РЛС дальнего обнаружения SCR-270, развернутая на северном побережье. Удивительна беспечность американцев! Станция работала не круглосуточно, а включалась лишь с четырех до семи часов. Более того, техника была совершенно новой и ее никто не принимал всерьез. Надо сказать, что и в советских частях ПВО некоторые на первых порах к данным РЛС относились с недоверием, но, убедившись на деле в их полезности, очень быстро изменили свое мнение. Американцы переменили его за одно утро...

В 7 часов утра РЛС на острове Оаху не выключили просто потому, что еще не пришла машина за дежурными сержантом и солдатом. В 7 часов 02 минуты на экране радара появилась отметка цели, находящейся на расстоянии около 140 миль. По характеру отражения можно было заключить, что обнаружена группа самолетов. Дальнейшее трудно объяснить с позиций здравого смысла. Операторы некоторое время раздумывали, а надо ли им вообще докладывать об обнаруженной цели, ведь их дежурство уже закончилось. Потом все-таки позвонили в информационный центр. Дежурный офицер посоветовал: «Не обращайте внимания, это свои!». В то утро действительно ждали 12 бомбардировщиков Б-17 из Сан-Франциско. Они вылетели накануне, демонтировав часть вооружения и установив дополнительные топливные баки.

В 7 часов 55 минут над Перл-Харбором появились японские самолеты. Хотя обнаружены они были почти за час до этого, никаких мер принято не было. Как на учениях, при ясном небе и отличной видимости, японцы сбрасывали бомбы и торпеды на неподвижно стоящие корабли. Американские истребители взлететь уже не могли – взлетные полосы были разрушены. Корабли взрывались и тонули тут же, в гавани. Море огня и дыма, полная сумятица и полная неразбериха. Прилетевшие Б-17 только усилили хаос. Зенитчики не знали, в кого стрелять, а пилоты – куда садиться. Многие из прилетевших самолетов погибли при посадке или были сбиты японцами. Налет продолжался около двух часов. Отдельные проявления мужества и героизма опомнившихся американских летчиков, моряков и зенитчиков уже ничего не могли изменить. Военно-морские силы США потеряли четыре линкора, крейсер, три эсминца. Еще больше кораблей было повреждено. 260 уничтоженных самолетов, 5000 убитых и раненых – таков результат самонадеянности и халатности. Японцы потеряли 29 самолетов и 55 летчиков.

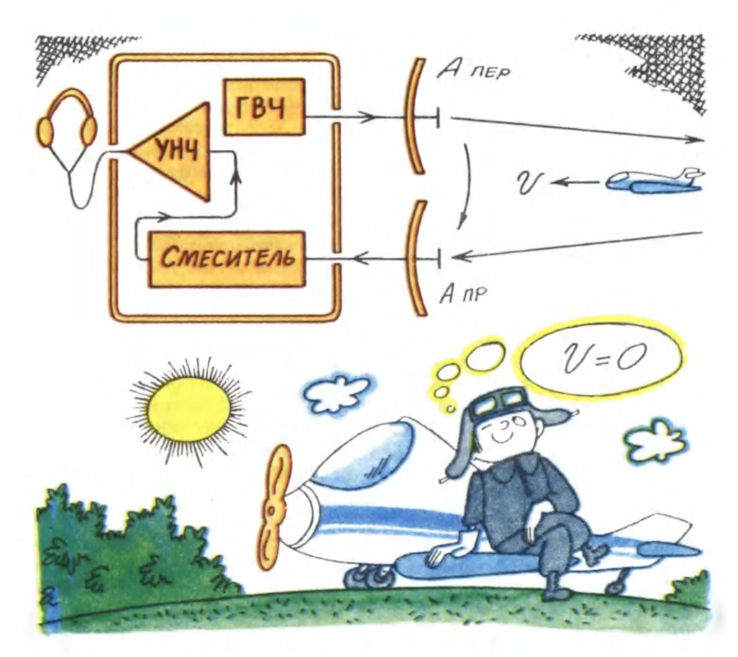
В тот же день президент США Ф. Рузвельт, выступая перед конгрессом, потребовал объявления войны Японии.

Промышленность США и Канады очень быстро наладила выпуск радиолокационных станций. Часть их по ленд-лизу поставлялась в СССР. Необходимость освоения все более коротких волн стимулировала и теоретические разработки. Это были годы рождения электродинамики сверхвысоких частот и волноводной техники.

Отгремела война, и перед радиолокационной техникой открылись новые сферы применения во многих отраслях народного хозяйства. Без радаров теперь немыслимы авиация и судовождение. Радиолокационные станции исследуют планеты Солнечной системы и поверхность нашей Земли, определяют параметры орбит спутников и обнаруживают скопления грозовых облаков. Техника радиолокации за последние годы неузнаваемо изменилась.

Радиолокационная техника

Рассмотрим структурные схемы простейших радиолокаторов. Доплеровская РЛС непрерывного излучения – самая простая из всех. Именно такими и были первые «радиоуловители» самолетов. Она содержит генератор высокочастотных колебаний (ГВЧ), передающую $A_{пер}$ и приемную $A_{пр}$ антенны, смеситель и усилитель низкой частоты биений (УНЧ). На его выходе включаются либо наушники, либо частотомер. Доплеровская РЛС не обнаруживает неподвижные предметы. Сигнал, отраженный от них, имеет ту же самую частоту, что и излучаемый. Но если обнаруживаемый объект движется в направлении локатора или от него, частота отраженного сигнала изменяется вследствие эффекта Доплера. С этим эффектом



Структурная схема доплеровской РЛС непрерывного излучения

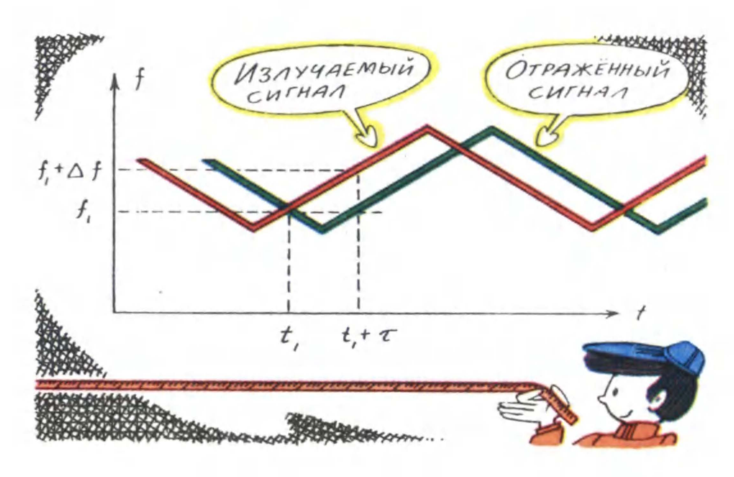
вы наверняка неоднократно встречались. Если на лодке в ветреную погоду двигаться навстречу волне, то удары волн о лодку становятся чаще. Если же вы меняете курс и уходите под ветер, то лодка как бы убегает от волны и удары волн становятся реже. В этих опытах в зависимости от направления движения и скорости лодки изменяется частота воспринимаемых нами колебаний водной поверхности – волн. Тот же эффект наблюдается и со звуковыми волнами. Тон гудка мчащегося на вас поезда кажется более высоким, а удаляющегося – более низким. При радиолокации эффект Доплера проявляется вдвое сильнее. Самолет, летящий навстречу излучаемой локатором волне, встречает более частые колебания электромагнитного поля. Переизлучая их во время движения, он еще повышает их частоту. При удалении же самолета от локатора частота отраженного сигнала понижается. В приемную антенну попадают два сигнала: прямого прохождения, просочившийся между антеннами, и отраженный от цели. В смесителе они взаимодействуют, образуя разностную частоту биений, в точности равную доплеровской $f_д = f_0 \frac{2v}{c}$, где f_0 – частота излучаемого сигнала; c – радиальная скорость цели; v – скорость радиоволн, равная скорости света.

Оценим, например, какова доплеровская частота для автомашины, скорость которой определяется инспектором ГАИ с помощью только что описанного устройства. Частота f_0 в этих локаторах лежит в диапазоне 10 ГГц, что соответствует длине волны 3 см, а скорость автомашины положим равной 30 м/с. Попутно заметим, что здесь имеет место явное нарушение правил движения, поскольку максимальная скорость на автодорогах установлена равной 90 км/ч, а 30 м/с соответствует 108 км/ч:

$$f_д = 10^{10}\,(\text{Гц})\frac{2\cdot 30\,(\text{м/с})}{3\cdot 10^{8}\,(\text{м/с})} = 2000 \text{ Гц} = 2 \text{ кГц}.$$

В этом случае на выходе локатора получается хорошо слышимый тон звуковой частоты. С помощью частотомера, установленного на выходе усилителя биений, можно достаточно точно определять радиальную скорость цели. Доплеровский метод измерения скорости используют и в самых современных радарах. Частотомер в этом случае вырабатывает цифровой код, который с помощью формирователя буквенно-цифровой информации выводится на основной экран РЛС. Рядом с отметкой цели оператор РЛС видит и цифру, соответствующую ее скорости, выраженной в узлах, километрах в час или метрах в секунду.

Определить дальность доплеровским локатором нельзя, но если частоту излучаемых колебаний изменять в некоторых пределах, т. е. ввести в генератор частотную модуляцию, то появляется возможность измерить дальность. Именно так и случилось в первом опыте Б. К. Шембеля при локации Крымских гор. Пусть частота передатчика изменяется по пилообразному закону. Частота отраженного сигнала также будет изменяться, но с запаздыванием на время τ распространения волн до цели и обратно. Если частота передатчика в какой-то момент t_1 равна f_1, то отраженный сигнал возвращается с этой же частотой. Но частота передатчика к времени $t_1 + \tau$ успеет измениться до значения $f_1 + \Delta f$, и в приемнике выделится сигнал биений с частотой Δf. Она тем выше, чем больше расстояние до цели.



Закон изменения частоты сигналов в ЧМ локаторе

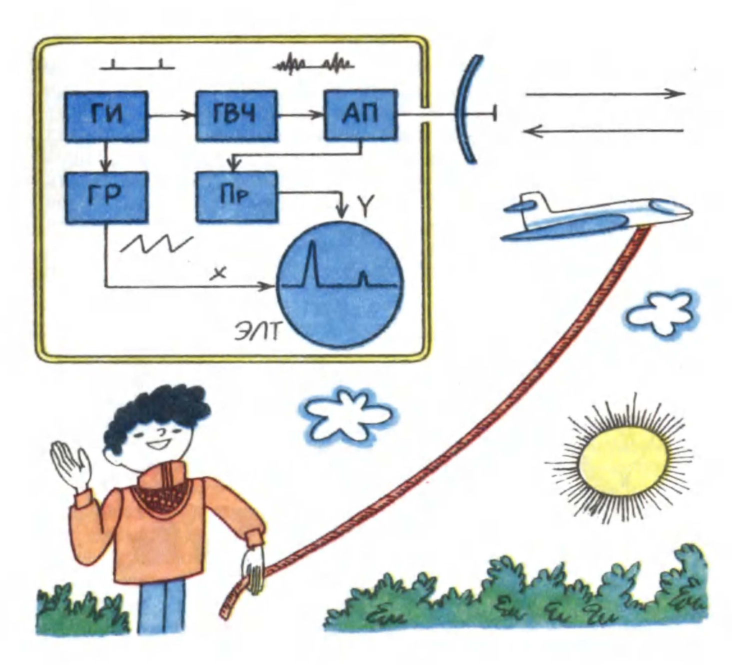
Частотно-модулированные локаторы создавались неоднократно для работы с одиночными целями. Например, на самолетах Гражданской авиации многие годы применялся радиовысотомер РВ-2, построенный именно на этом принципе. Частотно-модулированные локаторы разрабатывались и для выполнения операции стыковки космических кораблей на орбите, причем они обеспечивали очень хорошую точность определения дистанции.

Наибольшее распространение получил импульсный способ определения дальности. На рисунке показана структурная схема импульсного локатора. Его работой управляет генератор ипульсов (ГИ), следующих с относительно невысокой частотой повторения – порядка сотен импульсов в секунду. Мощные импульсы подаются на генератор высокой частоты (ГВЧ), вырабатывающий очень мощные короткие импульсы высокочастотных (ВЧ) колебаний. Например, если мощность ВЧ колебаний составляет 100 кВт, а длительность импульса 1 мкс, при частоте повторения 100 Гц средняя мощность ГВЧ составит всего 10 Вт, т.е. меньше, чем мощность обычной настольной лампы. Поэтому даже мощный импульсный генератор оказывается достаточно компактным и не перегревается при длительной работе. Через антенный переключатель (АП) ВЧ импульс поступает в антенну и излучается. После излучения импульса антенна подключается ко входу приемника (Пр). Разумеется, механический переключатель антенны непригоден: он не может обладать необходимым быстродействием. В первых одноантенных импульсных РЛС использовались газовые разрядники, по конструкции напоминавшие неоновую лампу, только они были рассчитаны на более высокую мощность. Установленный на входе приемника разрядник вспыхивал под действием мощного излучаемого импульса и замыкал вход приемника, «спасая» его от излишней ВЧ энергии. После излучения импульса разрядник погасал и не мешал отраженным сигналам поступать в приемник. В современных РЛС кроме газовых разрядников используют и полупроводниковые переключатели, выполненные на диодах.

Одновременно с излучением импульса запускается генератор развертки (ГР), вырабатывающий линейно нарастающее пилообразное напряжение. Оно поступает на пластины горизонтального отклонения электронно-лучевой трубки, экран которой и является широко известным по фильмам и книгам экраном РЛС. В результате луч перемещается слева направо, формируя линию развертки.

Усиленный и продетектированный сигнал с выхода приемника подается на пластины вертикального отклонения. Что же мы видим на экране? Прежде всего в самом начале линии развертки появится мощный импульс, все-таки «просочившийся» в приемник через разрядники антенного переключателя. Он будет служить началом шкалы дальности. Спустя некоторое время, нужное для распространения волн, придут сигналы от целей. Луч к этому времени переместится правее. Чем дальше цель, тем дальше от начала развертки окажутся отраженные импульсы. А их амплитуда будет соответствовать интенсивности отраженного сигнала. По ней в какой-то мере можно судить о величине цели.

Определять дальность на экране импульсного локатора очень просто: под линией развертки можно расположить бумажную шкалу. В первых РЛС так и делали. Но, поскольку такой способ уж очень несерьезен, в схему локатора ввели масштабные генераторы меток. Шкалу дальности стал рисовать электронный луч параллельно со своим основным назначением – индикацией целей. Генератор развертки совершенствовался, например достигнута возможность «растянуть» по горизонтали любое место линии развертки,



Структурная схема импульсной РЛС

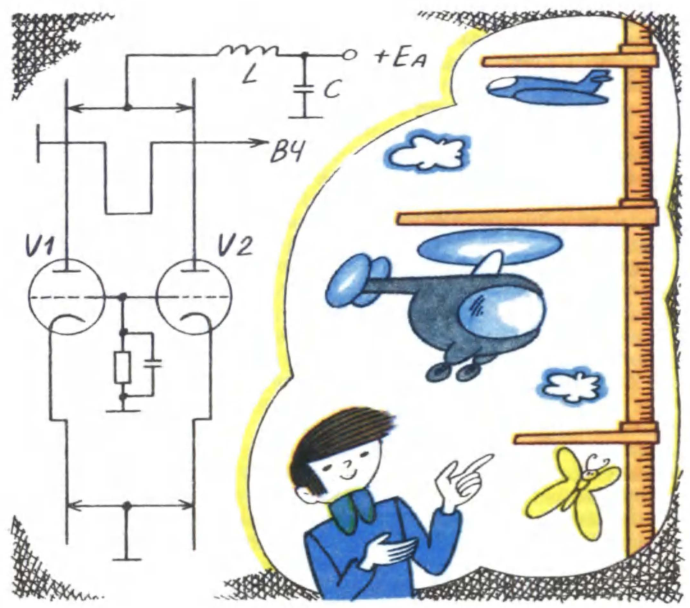
чтобы подробнее рассмотреть отраженные сигналы в заданном интервале дальностей. Всех усовершенствований и не перечислить, о них написаны целые тома учебников и руководств по радиолокационной технике.

У описанного индикатора (он получил название «индикатор типа А») есть существенный недостаток: он дает только дальность, а направление на цель надо определять по шкалам поворотного устройства антенны. Поэтому очень скоро предложили другой индикатор (типа В), используемый в РЛС кругового обзора. Из самого названия ясно, что антенна этой станции вращается вокруг вертикальной оси, «просматривая» все азимутальные направления от 0 до 360°. Структурная схема РЛС и порядок работы остаются прежними, но индикатор кругового обзора (ИКО) выполнен совсем по-другому. Пилообразное напряжение развертки подается на специальный кольцевой отклоняющий электрод, и линия развертки проходит по радиусу – от центра к краю экрана. Она поворачивается синхронно с антенной. Для поворота линии развертки на обычные отклоняющие пластины X и Y подают синусоидальные переменные напряжения в квадратуре, т. е. на одну пару пластин – косинусоидальное напряжение, а на другую – синусоидальное. Частоты этих напряжений равны частоте вращения антенны и составляют доли герца. Луч при этом описывал бы круги на экране, но, поскольку имеется еще напряжение радиальной развертки на кольцевом электроде, изменяющееся значительно быстрее с частотой повторения излучаемых импульсов, луч чертит линию развертки, вращающуюся вместе с вращением антенны.

Сигнал с выхода приемника подается на управляющий электрод (сетку) ЭЛТ и заставляет луч увеличивать яркость при наличии отраженных импульсов. Таким образом, на экране ИКО луч «рисует» радиолокационную карту местности. Место расположения самой РЛС соответствует центру экрана. Локатор кругового обзора очень хорошо подходит для морской навигации, дальнего обнаружения воздушных целей, диспетчерского контроля в Аэропортах. Теперь все чаще переходят к секторному обзору, при котором антенна «осматривает» не весь горизонт, а только нужную его часть. Большие наземные РЛС снабжают индикаторами нескольких типов: кругового обзора для обнаружения целей и контроля обстановки, типа А для точного определения дальности и т. д. Если, например, диаграмма направленности антенны может «качаться» еще и по углу



Индикатор кругового обзора



Триодный ВЧ генератор

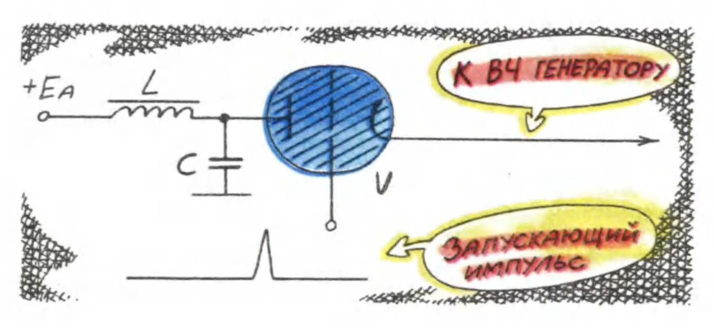
места (для этого обычно не наклоняют всю антенну, достаточно «качать» ее облучатель), то применяют в дополнение к ИКО индикатор «дальность–высота». В нем луч развертывается по радиусу и «качается» в некотором секторе синхронно с антенной, а координаты выбраны прямоугольными. Такой индикатор наглядно покажет и высоту цели.

Необходимо сказать несколько слов о конструкции отдельных элементов разработанных радиолокационных станций. Мощный генератор высокой частоты для локаторов, работающих в диапазоне метровых волн, выполняется на электронных лампах, как правило триодах. Но колебательный контур, состоящий из катушки и конденсатора, уже не пригоден, поскольку катушка для частот в десятки и сотни магагерц должна быть маленькой, а это несовместимо с высокой мощностью колебаний. Поэтому катушка вырождается в отрезок двухпроводной линии, выполненной из толстых медных трубок. Линия настраивается передвижным короткозамыкающим мостиком. Симметричная линия лучше всего совмещается с двухтактным генератором, схема которого и показана на рисунке. Конденсатора в контуре нет–его роль выполняют междуэлектродные емкости ламп. Через них осуществляется и обратная связь. Часть переменного анодного напряжения через емкость анод–катод возбуждает другой контур–линию, включенную между катодами ламп. Ее настройкой подбирают нужную для возбуждения колебаний фазу напряжения обратной связи. Сетки ламп заземляют по высокой частоте. Отбор мощности ВЧ колебаний осуществляют петлей связи, расположенной вблизи анодной линии. Напряжение анодного питания подают на короткозамыкающий мостик этой

линии через ВЧ дроссель (катушку индуктивности), изолирующий источник питания от ВЧ колебаний.

Генератор будет работать в импульсном режиме, если его питать не постоянным анодным напряжением, а мощными высоковольтными импульсами. Они генерируются в устройстве с тиратроном – газоразрядной лампой, поджигаемой управляющим импульсом. Пока тиратрон погашен, накопительный конденсатор C заряжается через дроссель с большой индуктивностью L от высоковольтного источника. Ток заряда невелик, а время заряда может достичь периода повторения импульсов. Короткий запускающий импульс поджигает тиратрон, и генератор ВЧ оказывается подключенным к накопительному конденсатору, заряженному до высокого потенциала (десятки киловольт). Генерируется очень короткий радиоимпульс, причем анодный ток ВЧ генератора может достичь десятков ампер. Заряд конденсатора расходуется в течение нескольких микросекунд или даже долей микросекунды, генерация прекращается, и тиратрон гаснет. Конденсатор C снова начинает медленно заряжаться через дроссель L. Если бы ВЧ генератор заставили работать при такой мощности несколько дольше, то электроды лампы неминуемо расплавились бы, выгорели или испарились. Только благодаря краткости импульсов ничего этого не происходит, а средняя мощность генератора оказывается для него невысокой и вполне безопасной.

Импульсный модулятор с накопительным конденсатором имеет один существенный недостаток. По мере расходования заряда конденсатора при генерировании радиоимпульса напряжение на нем быстро падает, а с ним – и мощность высокочастотных колебаний. В результате генерируется остроконечный радиоимпульс с пологим спадом. Гораздо выгоднее работать с прямоугольными импульсами, мощность которых в течение их длительности остается примерно постоянной. Прямоугольные импульсы будут генерироваться описанным генератором, если накопительный конденсатор заменить искусственной длинной линией, разомкнутой на свободном конце; например, может использоваться отрезок коаксиального кабеля. Волновое сопротивление линии должно равняться сопротивлению генератора ВЧ колебаний со стороны зажимов питания, т. е. отношению его анодного напряжения к анодному току. В момент поджигания тиратрона вдоль длинной линии побежит волна напряжения, разряжающая линию. Процесс закончится, когда волна напряжения, отразившись от разомкнутого конца линии, вернется к аноду тиратрона. Линия будет разряжена полностью, и тиратрон



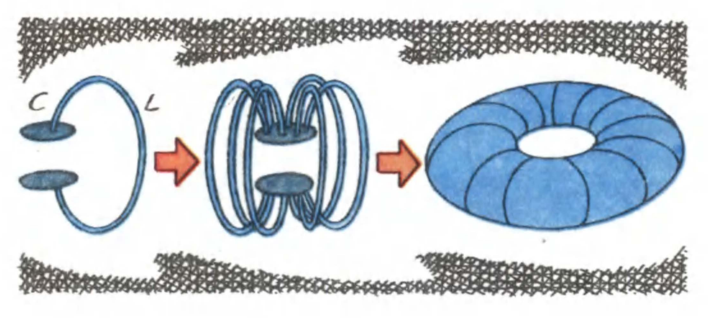
Импульсный генератор

погаснет. Таким образом, длительность импульса определяется длиной линии и равна отношению удвоенной длины линии к скорости распространения волн в ней. Генераторы модулирующих импульсов с искусственными длинными линиями получили самое широкое распространение в радиолокационной технике.

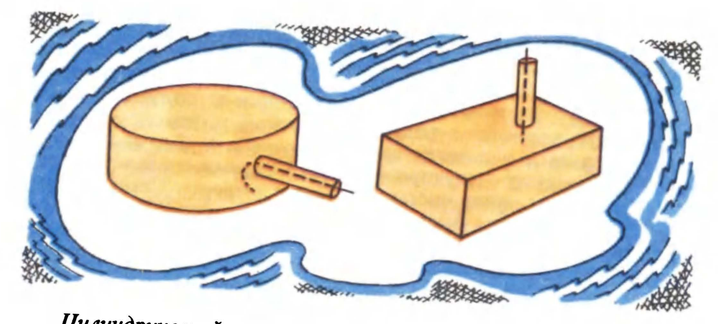
Для перехода к дециметровым, а потом и к сантиметровым волнам ВЧ генератор с двухпроводными линиями оказался непригодным. Ведь длина линии составляет менее четверти длины волны, так какой же она должна быть на волне, скажем, 3 см? Кроме того, время пролета электронов в лампе оказывается больше периода колебаний, что полностью нарушает работоспособность триода. И здесь нашли выход. Длинные линии–контуры заменили объемными резонаторами. Что же это такое? Поясним на примере. Возьмем ВЧ контур, содержащий индуктивность в виде катушки всего из одного витка и небольшой конденсатор. Будем стараться повысить его резонансную частоту, не уменьшая размеров. Но как, разве это можно? Можно. Подключим вторую такую же катушку–виток параллельно первой. Общая индуктивность уменьшится, а частота возрастет. Подключим третью, четвертую и т.д., пока витки не образуют сплошную стенку вокруг конденсатора. Получился тороидальный объемный резонатор. Раздвинем пластины, чтобы уменьшить емкость и еще повысить частоту. Образовался цилиндрический объемный резонатор. Его размеры составляют от нескольких длин волн до половины длины волны, соответствующей резонансной частоте. Энергия подводится к объемному резонатору и выводится из него с помощью штыря, петли или отверстия связи.

Объемный резонатор не обязательно должен быть цилиндрическим, он может быть и прямоугольным. Если длину прямоугольного резонатора увеличивать до бесконечности, мы получим волновод – полую металлическую трубу прямоугольного сечения, в которой может распространяться высокочастотная энергия. На сантиметровых волнах двухпроводные фидерные линии сильно излучают, а коаксиальные вносят большие потери. Поэтому передача колебаний к антенне осуществляется только с помощью волноводов.

В волноводах и объемных резонаторах уже трудно говорить о токах или напряжениях. Там существуют электрическое E и магнитное H поля, т.е. те же поля, что в электромагнитной волне, распространяющейся в свободном пространстве. Таким образом, в волноводе (в соответствии с его названием) распространяется уже хорошо нам знакомая электромагнитная волна. На рисунке стрел-



От колебательного контура к тороидальному объемному резонатору



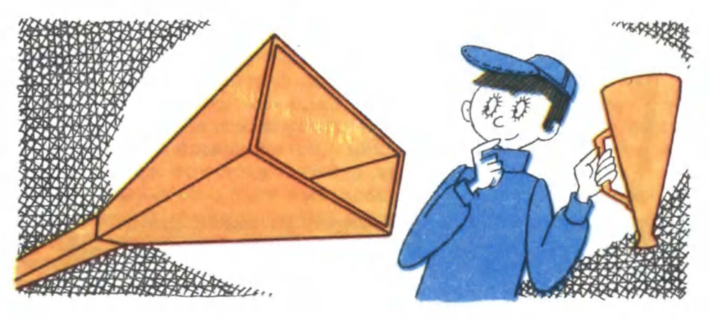
Цилиндрический и прямоугольный резонаторы

Волновод

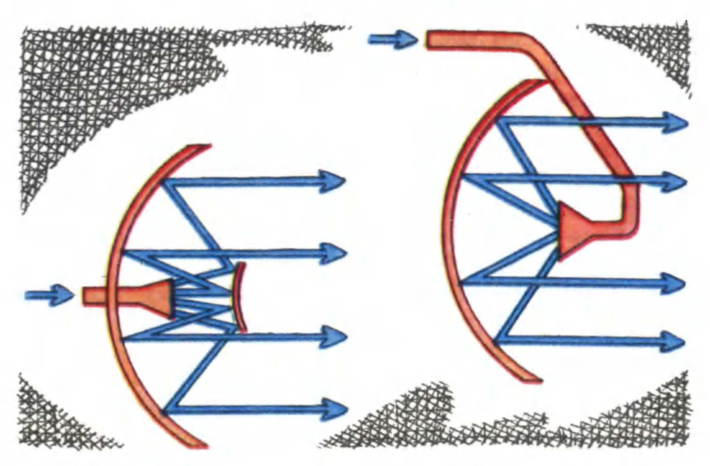
ками показаны направления электрического (сплошные линии) и магнитного (штриховые линии) полей.

Энергию волны из волновода в открытое пространство простым и естественным образом можно передать с помощью рупорной антенны. Хорошая рупорная антенна должна быть длинной, поскольку любые неоднородности в волноводе приводят к отражению распространяющейся энергии. Переход от волновода к рупору как раз и является такой неоднородностью, поэтому он должен быть достаточно плавным. Есть и еще одно соображение в пользу длинных рупоров. Чтобы правильно сформировалась диаграмма направленности, поле в раскрыве антенны должно быть синфазным. Это значит, что колебания поля электромагнитной волны в различных точках раскрыва должны происходить одновременно. Но при распространении от рупора и вдоль его грани волна проходит разный путь и колебания на краях раскрыва запаздывают относительно колебаний в центре. Если разница путей достигнет четверти, или даже половины длины волны, рупорная антенна окажется неэффективной. Для уменьшения указанной разницы путей, рупорные антенны делают длинными. Это не совсем удобно, поэтому в радиолокации предпочитают зеркальные антенны, а рупор используют в качестве облучателя зеркала. Ход волн-лучей в антенне с параболическим зеркалом ясен из рисунка. Чем больше размеры антенны, тем ýже ее диаграмма направленности. Угловая ширина диаграммы направленности φ связана с размером антенны уже знакомой нам формулой $\varphi = \lambda/D$, где угол φ выражается в радианах. Например, круглое зеркало диаметром 3 м при длине волны 3 см создает игольчатую диаграмму направленности с шириной лепестка всего 0,01 рад, или 0,57°.

Диаграмма игольчатого типа нужна далеко не всегда. Например, для корабельной РЛС важно определить пеленг объекта (другого корабля), а его высоту определять не нужно. В этом случае целесообразно выбрать диаграмму направленности «ножевого» ти-

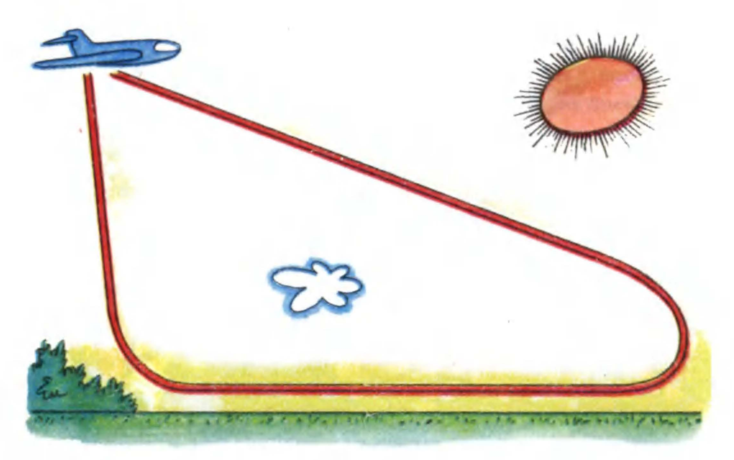


Рупорная антенна



Параболические антенны

па – узкую в горизонтальной плоскости и широкую – в вертикальной. Диаграмму «ножевого» типа создает антенна с прямоугольным раскрывом, широким в горизонтальной плоскости и узким – в вертикальной. Подобные же антенны используют и в самолетных РЛС кругового обзора. Более того, чтобы скомпенсировать естественное ослабление сигналов, приходящих с больших дальностей, используют косекансную диаграмму, показанную на рисунке. Она формируется благодаря специальной форме зеркала. Только не подумайте, что зеркала антенн радиолокаторов действительно имеют зеркальную поверхность. Этого совсем не требуется. Любая поверхность будет зеркальной для длин волн, намного больших, чем размер неоднородностей поверхности. Обычно считают, что размер неодно-



Косекансная диаграмма направленности самолетной РЛС с ИКО

родностей не должен превосходить 1/8 длины волны, т.е. $\lambda/8$. Для обычного оптического зеркала, отражающего световые волны с длиной 0,5 мкм, размер шероховатостей не должен превышать сотых долей микрометра. А зеркало локатора, работающего на длине волны 10 см, можно выполнить даже из металлической сетки с размером ячеек около 1 см. Так обычно и делают, чтобы уменьшить массу зеркала и ветровую нагрузку.

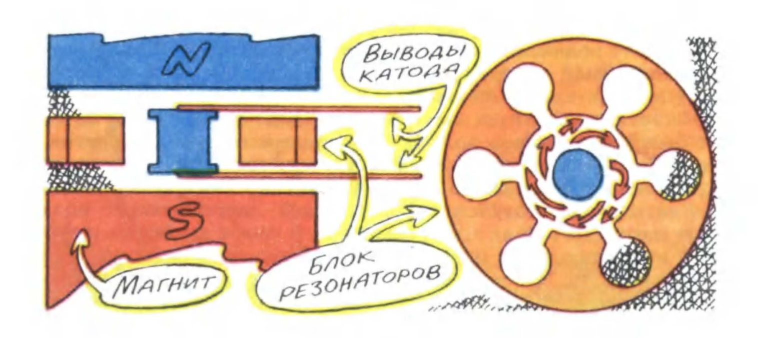
Но вернемся к генераторам. В годы второй мировой войны были разработаны конструкции принципиально новых генераторов сантиметровых волн – клистронов и магнетронов. В клистроне электронный луч формируется подобно тому, как это делается в ЭЛТ. Луч проходит последовательно через два объемных резонатора, настроенных на одну и ту же частоту. Если к первому резонатору подвести СВЧ колебания, луч окажется промодулированным по скорости. Электроны, пролетевшие резонатор за один полупериод колебаний, ускоряются, поскольку электрическое поле «подталкивает» их, а электроны, пролетевшие за второй полупериод, замедляются, так как их тормозит электрическое поле, и их скорость уменьшится. По пути ко второму резонатору электроны сгруппируются в «пакеты», поскольку «быстрые» электроны догонят «медленные». На еще большем расстоянии пакеты электронов снова рассеются, но для нас это уже неважно. Там, где электроны сгруппировались, стоит второй резонатор и возбуждается пакетами электронов или волнами их пространственного заряда. Энергия колебаний, отдаваемая электронами во второй резонатор, оказывается намного больше энергии, затраченной на модуляцию электронного луча. Так действует клистрон-усилитель. В генератор его превратить несложно: достаточно часть энергии из второго резонатора направить обратно, в первый.

Еще оригинальнее решена проблема генерации в отражательном клистроне. Он содержит только один резонатор. Пролетевшие сквозь резонатор электроны возвращаются обратно специальным электродом-отражателем, на который подан отрицательный потенциал $-U_{\text{отр}}$. Сгруппированные пакеты снова пролетают сквозь резонатор, отдавая запасенную энергию. Отражательные клистроны долгие годы служили гетеродинами в радиолокационных приемниках.

Бóльшую колебательную мощность отдает магнетрон – многорезонаторное электронное устройство. Он содержит мощный катод в виде трубки и еще более мощный анодный блок, выполненный из меди, с профрезерованными в нем резонаторами. Каждый резонатор открывается в сторону катода щелью. Вся конструкция помещается между полюсами мощного электромагнита так, чтобы магнитное поле было направлено по оси катода. На анод подается высокое положительное напряжение.

Вылетевшие из катода электроны устремляются к аноду, но не тут-то было! В магнитном поле на электрон действует сила Лоренца, пропорциональная его скорости. В результате траектория электрона искривляется и превращается в циклоиду. «Рой» электронов мчится вокруг катода под воздействием двух полей – электрического поля анода и магнитного поля электромагнита. В своем движении электронный поток проходит мимо щелей резонаторов и модулируется ими по скорости. Сформировавшись в «пакеты», поток отдает энергию резонатору, и вся система начинает генерировать СВЧ колебания. Все резонаторы сильно связаны между собой электронным потоком, поэтому отбор энергии производится только из одного резонатора.

Клистрон-усилитель и отражательный клистрон



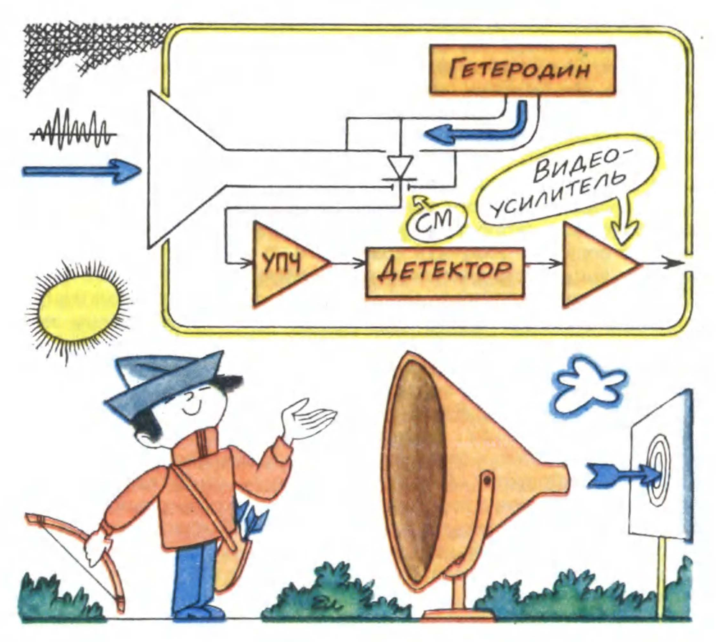
Магнетрон

Магнетроны дали возможность генерировать очень большие импульсные мощности на сантиметровых волнах, благодаря чему резко повысилась дальность действия и точность РЛС.

Что же касается приемников сантиметровых волн, то наибольшее распространение получил супергетеродин с кристаллическим смесителем (СМ) на входе. Специальный полупроводниковый диод с малой емкостью *p-n* перехода монтируется прямо в волноводе, идущем от антенного переключателя. К принимаемому сигналу добавляется сигнал местного гетеродина, собранного на маломощном отражательном клистроне. Частота гетеродина отличается от частоты принимаемых импульсов на значение, равное промежуточной частоте (ПЧ). Промежуточная частота выбирается в диапазоне 30...100 МГц, т.е. там, где сравнительно несложно получить большое усиление с помощью электронных ламп или транзисторов.

Основное усиление сигнала происходит в тракте ПЧ. Оно может достигать 10^6. Принимаются меры по выравниванию амплитуд сильных и слабых отраженных сигналов. К ним относятся усилители ПЧ с логарифмической амплитудной характеристикой, различные системы автоматической регулировки усиления. На входе приемника сильные сигналы от близких объектов и слабые от далеких целей могут различаться на 100...120 дБ. В усилителе ПЧ эта разница уменьшается до 20...30 дБ, и тогда все отражения будут хорошо видны на экране индикатора. Последними элементами структурной схемы приемника являются детектор и усилитель видеоимпульсов.

Стремление увеличить дальность действия привело к тому, что радиолокация, как и многие другие области техники, пережила эпоху «гигантомании». Создавались все более мощные магнетроны, антен-



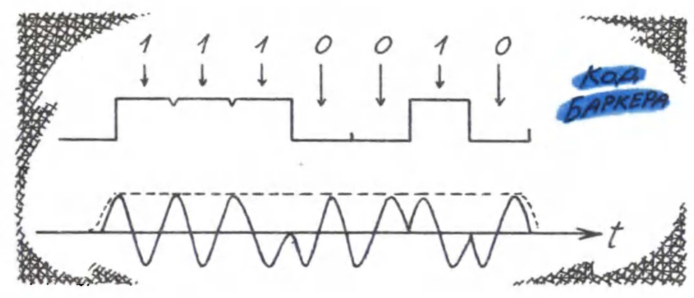
Супергетеродинный приемник РЛС

ны все бóльших размеров, устанавливавшиеся на могучих поворотных платформах. Платформа вращалась со скоростью несколько оборотов в минуту, и поэтому операторы не выдерживали более двух часов подобной карусели. В последующих разработках операторы уже размещались вне поворотных платформ. Мощность РЛС достигала 10 и более мегаватт (миллионов ватт) в импульсе. Более мощные передатчики создавать было уже физически невозможно: резонаторы и волноводы не выдерживали высокой напряженности электромагнитного поля, в них происходили неуправляемые разряды. Появились данные и о биологической опасности высококонцентрированного излучения РЛС. Кто-то из операторов зимой погрел руки в фокусе параболической антенны. На руках перестали заживать царапины, а нервные каналы и лимфатические узлы воспалились. Со временем появились нормы на предельную плотность потока СВЧ энергии, допустимые для работы человека (кратковременно допускается до 10 мВт/см^2).

Итак, мощности дошли до предела. Но у радара, выполненного по традиционной, уже описанной схеме есть еще много других внутренних противоречий. Например, между точностью определения координат и временем поиска цели. Для повышения точности нужен «игольчатый» луч. Но обнаружить им цель в безбрежном воздушном океане – это все равно, что найти иголку в стоге сена! Искать цель лучше широким лучом. Следовательно, надо управлять формой луча. Но как это сделать, если антенной служит несгибаемое, штампованное из металла зеркало, закрепленное на литой станине?

Другая проблема. Надо узнать дальность до самолета и его скорость. Скорость лучше всего определяется доплеровским методом, по разности частот посланного и отраженного импульсов. Но импульс надо сделать как можно короче, чтобы точнее измерить дальность. А чем короче импульс, тем с большей погрешностью определяется его частота. Ведь для этого надо сосчитать число периодов за определенный промежуток времени. Этот промежуток равен длительности импульса; чем она меньше, тем меньше периодов укладывается в импульсе и тем хуже точность определения скорости. Следовательно, нужно управлять и формой импульса: во время измерения дальности импульс надо сделать коротким, а во время определения скорости – длинным. Ученые предложили и другое, лучшее решение – излучать сравнительно длинные импульсы, а внутри импульса ввести модуляцию, т. е. изменять частоту или фазу колебаний по определенному закону. Такие сложные радиолокационные сигналы позволили преодолеть роковое «соотношение неопределенности» в радиолокации и одновременно повысить точность определения и дальности, и скорости.

Вот пример сложного сигнала. Относительно длинный радиолокационный импульс разбивается на некоторое число более коротких отрезков. В течение каждого отрезка фаза сигнала имеет значение либо 0, либо π, в сответствии с цифровым двоичным кодом. Код Баркера, например, обладает интересным свойством: помноженный на такой же код с некоторым сдвигом и усредненный, он дает максимальное значение результата только в том случае, когда сдвиг равен нулю. В приемнике отраженный сигнал детектируется фазовым детектором и подается на сравнивающее устройство, в котором уже заложен переданный код. Когда все разряды сравниваемых кодов совпадают, на выходе сравнивающего устройства появляется сигнал совпадения. На рисунке показан семиразрядный код Баркера. Хотя длительность всего импульса в семь раз больше длительности



Фазоманипулированный сигнал

передачи одного разряда, разрешающая способность РЛС по дальности будет соответствовать именно длительности одного разряда. Энергия всего импульса увеличится в семь раз, что повысит и дальнойсть действия, и точность определения скорости.

Возможность когерентного накопления сигнала, т.е. суммирования амплитуд многих последовательно излучаемых импульсов, достигается лишь тогда, когда фаза следующих друг за другом импульсов не изменяется. Передатчик в этом случае уже нельзя выполнить в виде автогенератора, например, на магнетроне. Нужен задающий генератор, вырабатывающий непрерывные колебания со стабильной частотой и фазой и усилитель мощности с импульсной модуляцией.

Новые требования, предъявляемые к РЛС, привели к разработке совершенно новой техники. С появлением транзисторов мощные мегаваттные передатчики РЛС постепенно ушли в прошлое. Что же, уменьшилась излучаемая мощность? Ничуть не бывало! Даже возросла. Только создаваться она стала не одним мощным передатчиком, а многими маломощными. Вот как это случилось.

ЭВМ управляет радаром

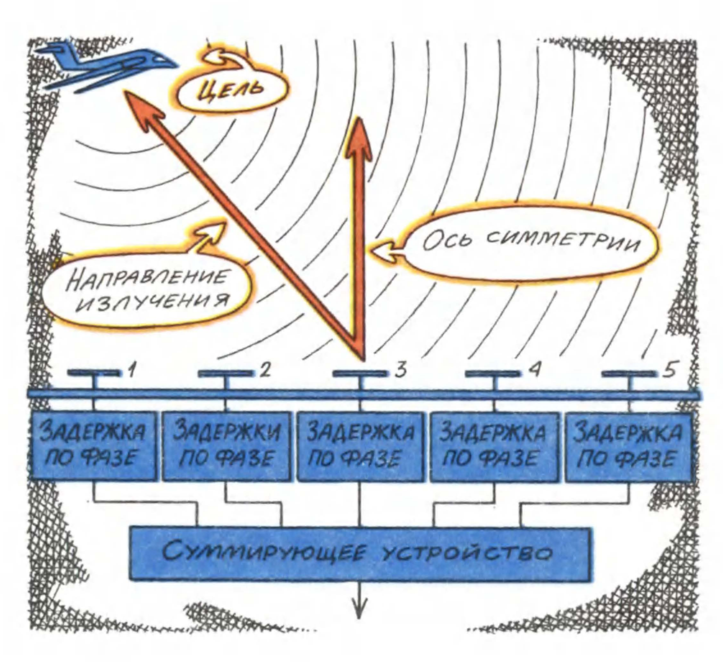
Опять управление? Конечно. В радиолокации, как нигде, мы сталкиваемся с такими тремя китами современной электроники, как управление, сигналы, информация. Надо управлять диаграммой направленности антенны и ее положением в пространстве, надо управлять формой сигнала и, наконец, надо обрабатывать принятые сигналы и извлекать из них информацию об объектах. Интуитивно ясно, что лучше всего с этими задачами справится компьютер. А как он будет это делать, я сейчас расскажу.

Подлинная революция в радиолокационной технике началась с изобретением фазированных антенных решеток. Представьте себе плоскость, равномерно заполненную излучателями: диполями, раскрывами маленьких рупоров или просто щелями в волноводах. Плоскость – это раскрыв антенны. Математики рассчитали: чтобы получить заданную диаграмму направленности, надо создать определенное распределение амплитуд и фаз излучаемого поля в раскрыве. Диаграмма и распределение по раскрыву однозначно связаны. Нужное распределение легко получается, если регулировать амплитуды и фазы волн, создаваемых отдельными излучателями. Но не

вручную же регулировать! Конечно, нет. Электрическим путем, а управляющие сигналы пусть вырабатывает компьютер.

Открывающиеся возможности поистине огромны. Можно сформировать луч любой конфигурации. Можно не один, а три, двенадцать лучей, сколько угодно! Как многоглазное существо, радар с фазированной антенной решеткой может следить каждым глазом-лучом за своей целью. И незачем теперь конструировать один мощный магнетрон – пусть каждый излучатель питается от своего маломощного транзисторного усилителя мощности. А все усилители получат возбуждение от одного высокостабильного задающего генератора. Таким образом заодно будет решена и проблема когерентности излучения. Фазированная антенная решетка может содержать тысячи и даже десятки тысяч элементов. Если изготавливать их традиционным способом – с широким использованием ручного труда слесарей и радиомонтажников, стоимость РЛС получится очень высокой. На помощь приходит интегральная технология.

Интегральные СВЧ микросхемы? Да, теперь это уже реальность. На смену медным трубам-волноводам пришли микрополосковые линии передачи. На подложку из стекла или СВЧ керамики с двух сторон наносят металлизированные слои. Один слой служит «землей» или общим проводом. Другой слой протравливается, образуя линии передачи, фильтры, направленные ответвители – одним словом, весь ассортимент волноводной СВЧ техники. На эту же подложку напаивают кремниевые кристаллы транзисторов, диодов и микросхем управления.



Фазированная антенная решетка

Какие же результаты достигнуты за последние годы? Сказать «потрясающие» – значит не сказать ничего. Вот несколько цифр. Один из последних представителей эпохи «гигантомании» – американский радар системы дальнего обнаружения и оповещения BMEWS. Он обеспечивает дальность действия по малым воздушным целям до 5000 км, мощность в импульсе 50...70 МВт, имеет полноповоротное зеркало диаметром несколько десятков метров. Ну а более современный радар с фазированной антенной решеткой? В одном из подобных радаров решетка содержит 1000 элементов, и каждый излучает в импульсе мощность по 1 МВт. Таким образом, общая мощность, излучаемая антенной, достигает 1000 МВт. Добавьте сюда обработку и накопление сигнала с помощью цифровой ЭВМ, и получится результат совсем уж невероятный: объект величиной с маленький арбуз этот локатор обнаружит на расстоянии 1600 км!

Когда техника развивается и преодолевает новые рубежи, должны появляться открытия. Они и последовали. Было открыто, например, радиоизлучение Солнца. Ничего удивительного в этом факте, конечно, нет: излучает ведь Солнце в диапазоне видимых световых электромагнитных волн, так почему бы ему и не излучать в радиодиапазоне? Удивительно другое – радиоизлучение Солнца открыли, изучая после второй мировой войны рассекреченные документы Британской радиолокационной службы ПВО. Вы помните, что вдоль побережья Англии была построена цепь РЛС. «Смотрели» они на восток, откуда ожидались немецкие самолеты, а потом и ракеты, небезызвестные ФАУ-1 и ФАУ-2. И каждое утро уровень помех на экранах радаров возрастал. Думали, что это немцы создают искусственные помехи. Но, сопоставив время появления помех с астрономическими данными о времени восхода Солнца, получили точное совпадение. Открытие было сделано в 1944 году на волне 1,87 м. Теперь радиоастрономы постоянно наблюдают радиоизлучение Солнца на всех волнах – от миллиметровых до метровых, что помогает предсказывать магнитные бури и нарушения радиосвязи на Земле. Прекрасный пример неожиданного астрономического открытия, а также иллюстрация того, сколь велика чувствительность радиолокационных приемников, ведь поток радиоизлучения Солнца очень мал. На волне 1,5 м он примерно в 200 000 раз меньше, чем от 50-ваттного радиопередатчика, работающего на той же волне и удаленного на 100 км.

Другое открытие. Когда мощность передатчиков и чувствительность приемников РЛС дальнего обнаружения намного возросли (помните арбуз на расстоянии 1600 км?), стали регистрировать отражения неизвестно от чего. «Опять обнаружили «ангелов»» – шутили специалисты. Ну добро бы туча попала в диаграмму направленности. Отражения от облаков получаются, они хорошо известны, ведь капли воды, хотя и незначительно, рассеивают электромагнитные волны. К слову сказать, еще во время войны часто наблюдали отражения от облаков, правда искусственных облаков из станиолевых полосок. Экипаж каждого бомбардировщика союзников, отправляясь с грузом бомб в очередной налет на Германию, брал с собой несколько мешков фольги, мелко нарубленной короткими ленточками-диполями. В месте предполагаемого обнаружения самолета немецкими РЛС мешок фольги просто высыпался за борт. Долгое время полоски фольги, кружась, опускались на землю. А на экране радара видно было лишь устрашающе огромное отражение от облака фольги, в котором тонуло маленькое

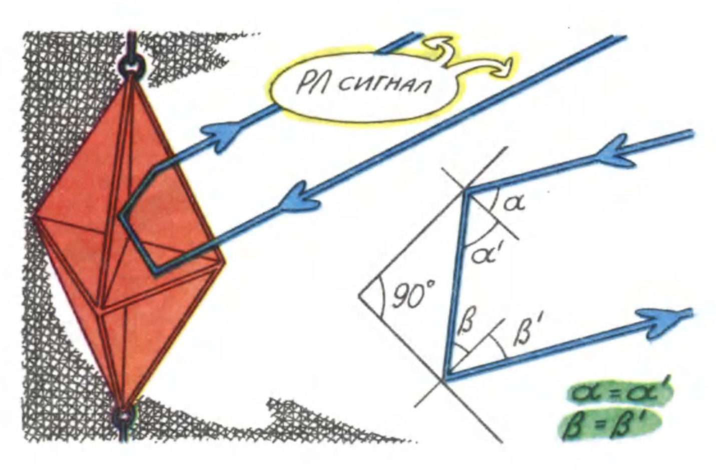
пятнышко отражения от самолета. Так зародилось то, что потом получило название радиоэлектронного противодействия.

Это история. Сейчас метеорологические РЛС обнаруживают каждую дождевую тучу, каждое градовое облако, что позволяет заблаговременно оповещать о них работников сельского хозяйства. Но вернемся к «ангелам». В воздухе заведомо ничего нет, в лучшие телескопы не видно ни пятнышка, посланный истребитель слетал и ничего не обнаружил, а отражение на экране есть. Исследуя характер и распределение по толще атмосферы отражений от «ангелов», ученые пришли к выводу, что виноваты неоднородности показателя преломления чистого воздуха. В нормальных условиях он очень мал: всего 1,0003. Измеряют его обычно в *N* единицах – миллионных долях разности между значением показателя преломления и единицей. В обычных условиях получается 300 *N* единиц. Приходилось ли вам видеть клубы дыма или пара над большим костром, пожарищем или крупной теплоэлектростанцией? Разумеется, видели. Теплый воздух поднимается вверх неравномерно, а очагами, клубами. То же самое получается и в ясный летний день. Клубы нагретого от земли воздуха, совершенно невидимые глазом, поднимаются от нагретой земли кверху. Их характер и расположение видел каждый, когда в летнее утро на безоблачном прежде небе появляются первые легкие кучевые облака. Каждое облако – вершина клуба теплого воздуха, поднявшегося с земли. Показатель преломления зависит от температуры и влажности, поэтому внутри клуба теплого воздуха он отличается на несколько *N* единиц. Этого достаточно, чтобы создать слабое радиолокационное отражение. Таким образом, локатор дал аэрологам, физикам и метеорологам новое средство исследования структуры атмосферы.

Между прочим, метеорологи в своих исследованиях уже давно используют не столь мощные, сравнительно простые и дешевые радиолокаторы. Они оказались незаменимыми при радиозондировании атмосферы. Вы наверняка слышали про метеорологические шары-зонды, регулярно запускаемые с метеостанций. Это небольшой, наполненный легким газом шар с привязанной к нему картонной коробкой. В коробке размещены датчики давления, температуры и влажности, а также простенький телеметрический радиопередатчик, по определенной программе сообщающий на метеостанцию данные о состоянии атмосферы. А наблюдая за дрейфом шара в воздушных потоках, можно узнавать направление и силу ветра на разных высотах. Все эти данные крайне важны и для научных исследований, и для прогнозов погоды. Но как наблюдать за шаром, поднимающимся на высоту до 30 км и уносимым ветром на еще большее расстояние? С помощью теодолита или даже сильного телескопа это можно сделать лишь в исключительно ясную погоду. Как быть при дымке, облаках, в пасмурную погоду? На помощь приходит радар. Для него дымка, облака и туман не помеха. С равным успехом за шаром можно следить и ночью. Чтобы шар лучше отражал радиоволны, его пластиковую или резиновую оболочку металлизируют – покрывают слоем алюминиевой пудры. Но это не лучший способ сделать шар-зонд «заметнее» в луче РЛС. Часто используют так называемые радиолокационные ответчики – простые транзисторные генераторы, настроенные на частоту РЛС. Ответчик включается зондирующим импульсом РЛС и немедленно генерирует собственный импульс, создающий на экране РЛС яркую и четкую отметку. Он оснащен слабонаправленной антенной (обычно полуволновый диполь), поэтому его ориентация в полете практически значения не имеет.

У описанного активного ответчика есть один существенный недостаток: он «отвечает» только тому радару, на частоту которого настроен. Кроме того, ему нужен источник питания. Предположим, что вы яхтсмен и собираетесь на небольшой деревянной яхте выйти на акваторию с оживленным движением судов. Вам надо позаботиться о том, чтобы все суда вас хорошо «видели» и случайно не утопили в условиях плохой видимости. А поскольку в этих условиях навигация осуществляется в основном с помощью корабельных РЛС, вам нужен эффективный радиолокационный отражатель. Такие отражатели есть, и ни один яхтсмен не выйдет без него в море. Пожалуй, проще всех по конструкции уголковые отражатели. Они выполняются из трех взаимно перпендикулярных плоских металлических листов. При этом с какой бы стороны ни проходил радиолокационный сигнал, он отражается строго в обратном направлении. Это можно доказать, воспользовавшись законом геометрической оптики: угол падения равен углу отражения. Закон геометрической оптики применим, если размеры отражателя существенно больше длины волны. Например, уголковый отражатель со стороной 30 см будет прекрасно виден на экране РЛС, работающей в трехсантиметровом диапазоне волн. Эффективная площадь рассеяния такого «уголка» достигает нескольких квадратных метров, т. е. как и у небольшого самолета. Уголковые отражатели применяют и на суше, например для обозначения границ взлетного поля аэродрома. На экране самолетной РЛС отражатели видны яркими точками.

Теперь вас ожидает рассказ со сказочным сюжетом. Представьте самолет-разведчик, летящий вдоль границы. Он не залетает на территорию чужой страны и «просматривает» ее лучом радара. На выходе РЛС или даже потом, на земле, после обработки данных, получается подробнейшая карта чужой территории, да какая карта! На расстоянии нескольких сотен километров можно разглядеть каждую улицу, каждый дом, отдельные автомашины. «Ну, уж извините, – скажет читатель, – такое невозможно даже при наблюдении в самый лучший оптический телескоп». Вы правы, с помощью оптического телескопа такое разрешение получить почти невозможно, а с



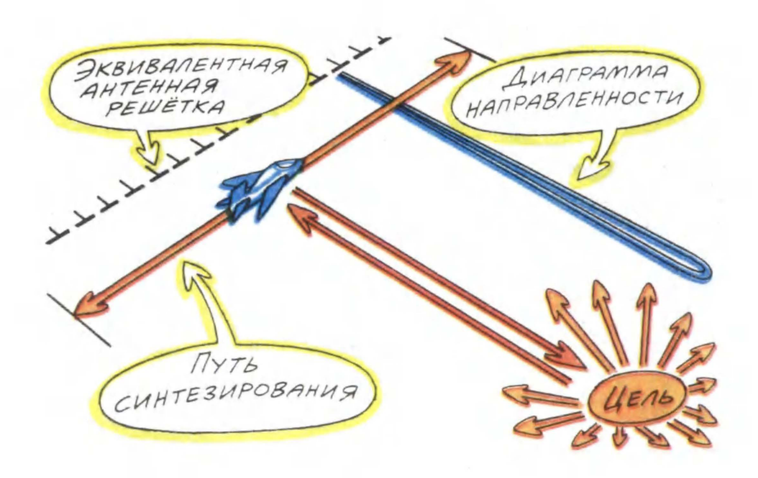
Уголковый отражатель и принцип его действия

помощью радара – да. То, что я рассказал, не сказка, это было сделано еще десять – пятнадцать лет назад.

Вот самое последнее достижение. К Венере в 1984 году были посланы две советские межпланетные станции – Венера-15 и Венера-16. Четыре месяца они были в полете, пока не вышли на околовенерианскую орбиту высотой 1000...2000 км. С этой огромной высоты заработали радиолокаторы. Было проведено много сеансов локации поверхности. Сквозь плотный слой облаков осуществлялось ее детальное картографическое исследование. Разрешающая способность локаторов достигала 1 км, а точность определения высоты – 30 м. Данные передавались на Землю по космической радиолинии и обрабатывались уже здесь, на Земле.

Руководитель коллектива, создавшего уникальную аппаратуру, академик А. Ф. Богомолов рассказывает, что при использовании традиционной радиолокационной техники понадобились бы антенны диаметром 60...70 м. Доставить такие антенны к Венере было нереально. Поэтому и использовали новый тип радара – радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой. Что же это за локатор, превосходящий по разрешающей способности лучшие оптические приборы?

Вернемся к примеру с самолетом, летящим вдоль границы. Его радар «смотрит» вбок, перпендикулярно направлению полета. Отсюда и название – «РЛС бокового обзора». Для разрешения объектов размером в несколько метров на расстоянии, скажем, 100 км ширина луча должна составлять 10^{-5} рад, или около двух угловых секунд. На волне длиной 3 см апертуру обычной антенны вдоль направления полета надо было бы сделать равной 3 км, что, разумеется, нереально: антенна-то самолетная. А что, если воспользоваться тем обстоятельством, что самолет с его реальной маленькой антенной последовательно проходит все это расстояние. Ведь тем самым как бы получаем антенну с воображаемой, синтезированной апертурой. В начале нужного нам трехкилометрового отрезка трассы полета самолета РЛС излучает импульсы, а отраженные сигналы запомина-



РЛС бокового обзора

ются в ЭВМ или записываются на пленке с учетом их амплитуд и фаз. То же самое делается и на всем пути синтезирования. А затем все записанные сигналы складываются так, как это сделала бы реальная антенна с длиной 3 км.

Обработка сигналов при синтезировании очень сложна. Прежде всего импульсы должны быть когерентными, т.е. с неизменной частотой и фазой. Отражающих целей много, и объем обрабатываемой информации громаден. В первых опытах использовали фотопленку и оптическую систему обработки в когерентном лазерном свете. Ведь записанная информация об амплитуде и фазе отраженных сигналов является не чем иным, как голограммой [1], только снятой не в оптическом, а в радиодиапазоне. Голограмма несет всю информацию об объектах, сумей только ее обработать! Теперь эта задача по плечу большим цифровым ЭВМ, и изображение местности, снятой радаром бокового обзора с синтезированной апертурой, можно получать прямо на ходу, в полете.

Чудес в радиолокации еще очень много. Эта область науки интересна и для математиков, и для физиков, и для радиоинженеров – всем найдется сфера приложения сил.

10. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Глава, в которой автор не будет вспоминать никаких сказочных чудес по той простой причине, что действительность далеко превосходит их. Расскажет о том, что казалось невероятным еще вчера, стало обыденным сегодня, и о том, что нас ждет завтра. И наконец, о том, что даже представить себе пока трудно. Одним словом – об электронных вычислительных машинах, информационных комплексах и о патентном поиске не выходя из дома

Что, зачем и как считают люди

Все достижения цивилизации созданы трудом, и, чтобы приумножить их или хотя бы сохранить на прежнем уровне, надо очень много работать. Настолько много, что традиционными методами и инструментами с таким объемом работы справиться нельзя. Возьмем, например, счетную вычислительную работу.

Робинзону Крузо пришлось делать зарубки на деревяшке, считая дни до прибытия спасительного судна, а число их составляло 365 в году, всего он провел на необитаемом острове 28 лет, да еще надо учесть високосные годы... Так и хочется попросить для расчетов бумагу и карандаш, потому что сделать это в уме уже непросто.

---

[1] Голограмма – интерференционная картина световых волн, содержащая полную информацию об объекте. Голограмма записывается на светочувствительной поверхности и при освещении ее когерентным светом создает объемное изображение объекта.

Однако сейчас некоторые школьники попросят микрокалькулятор – времена меняются! Еще в прошлом веке делать зарубки на палке перестали – хлопотно и неудобно. Изобрели конторские счеты – прибор на редкость простой и долгоживущий. В принципиальном отношении они недалеко ушли от четок средневекового монаха. Правда, у счетов есть и одно неоспоримо прогрессивное нововведение – система счета по разрядам, соответствующим разрядам десятичных чисел.

В 1641 году Б. Паскалем была изобретена механическая машинка для арифметических вычислений. Однако первую действующую модель, выполняющую четыре арифметических действия, построил немецкий часовой мастер Ган только в 1790 году. Лишь через сто лет, в 1890 году, петербургский механик В. Однер наладил производство отечественных арифмометров. Они «умели» складывать и вычитать многозначные числа. Я не знаю, как устроен механический арифмометр, но людям свойственно уважать сложное и непонятное. Так и я преклоняюсь перед смекалкой и талантом механиков, сумевших создать это хитроумное переплетение зубчатых колесиков, кнопок и рычагов. Позже появились электрические арифмометры (не путайте с электронными!). Там все было то же самое, но ручной привод был заменен электрическим. Набрал нужные числа, нажал кнопку – «хр...р...р..юк» – выскочил в окошечке результат. Эти старинные арифмометры напоминали старые кассовые аппараты, на которых еще недавно работали кассиры магазинов.

Даже автоматизировав выполнение четырех арифметических действий, мы не выйдем за пределы школьной науки – арифметики. А как быть с алгеброй, дифференциальными уравнениями, вариационным исчислением, теорией функций комплексного переменного и многими-многими другими математическими дисциплинами? Не подумайте, что математики придумали эти науки для собственного развлечения. Они очень нужны всем в практической деятельности. Вот пример. Мы уже рассматривали грузик на веревочке – обыкновенный маятник. Его движение описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Найти закон движения маятника означает решить это уравнение. А как это сделать, подсказывает математика. Став очень сложной наукой, она достигла больших успехов. И все-таки математика не может решить аналитическим путем многие задачи, встречающиеся на практике. Решить задачу аналитически – это значит выразить ответ в виде формулы. Но на практике есть зависимости, для которых и формулы подходящей не подберешь. Например, квадратное алгебраическое уравнение решается аналитически и в школьных тетрадях. Вы писали формулу $x_{1,2} = \dots$ и т. д. Сами помните. Для уравнения пятой или шестой степени такой формулы написать уже нельзя. Еще хуже обстоит дело с дифференциальными уравнениями. Они бывают такими, что ответ просто невозможно выразить аналитическими формулами.

Как же быть? Нам останется только одно: решать наши «нерешаемые» уравнения числовыми методами. Как это делается? Да очень просто: берут всевозможные числа и подставляют в уравнение. То число, которое удовлетворит уравнению, и есть его решение для заданных начальных условий. Конечно, это Сизифов труд – перебирать подряд все числа. Но и здесь математики нашли оптимальные пути решения. Если, взяв одно число, мы получили то-то, значит, надо взять другое число, гораздо большее, а если получили вот это, то надо взять немного меньшее число. Возникает определенная логика перебора чисел, кратчайшим путем ведущая к цели. Вы уже, наверно, догадываетесь, что численные методы как нельзя лучше

подходят для цифровых ЭВМ, а оптимальный алгоритм, логику решения можно заложить в программе, по которой производит расчеты ЭВМ.

Но еще совсем недавно были только арифмометры, которыми пытались механизировать труд больших «вычислительных центров» при крупных бухгалтериях или банках. Решать дифференциальные уравнения с помощью арифмометра и не пытались, вполне справедливо предполагая полную бесполезность этого занятия.

С рождением электронной техники появились довольно любопытные изобретения в области так называемых аналоговых вычислительных машин. Одно время им даже предсказывали славное будущее (заметим, что предсказание сбылось лишь частично). В аналоговых ЭВМ числа или переменные (x) представляются электрическим сигналом, например напряжением. А математические операции производятся электронными устройствами. Например, усилитель с двумя входами может служить сумматором, дифференциальный усилитель – вычитателем, кольцевой балансный модулятор – перемножителем, и т. д.

Собственно говоря, любое аналоговое устройство обработки сигналов является аналоговой ЭВМ. Более того, в последнее время в теоретической радиотехнике возникло новое направление – синтез оптимальных устройств для генерирования и обработки сигналов на основе моделирования систем дифференциальных уравнений, описывающих происходящие при этом процессы. Таким образом, аналоговые ЭВМ еще остались и будут совершенствоваться в тех областях, где имеют дело с аналоговыми сигналами.

Для выполнения математических расчетов аналоговые ЭВМ не совсем подходят по нескольким причинам, характерным вообще для аналоговой техники. Во-первых, диапазон сигналов в них, а следовательно, и диапазон значений переменных (x) весьма ограничены. Снизу – собственными шумами элементов вычислителя, сверху – «заходом» тех же элементов в области насыщения. Во-вторых, элементы аналоговой ЭВМ, выполняющие математические операции, неизбежно вносят погрешность. А при увеличении числа математических действий погрешности накапливаются. Поэтому и точность расчетов на аналоговых ЭВМ ограничена. Этих двух недостатков вполне хватает, чтобы отказаться от аналоговых ЭВМ при математических расчетах и искать более совершенные способы вычислений.

Идея создания цифровых ЭВМ принадлежит американскому математику фон Нейману. Он высказал ее еще в начале 40-х годов, когда при создании электронных схем экономили каждую радиолампу. По самым скромным оценкам, для ЭВМ требовались тысячи ламп! Поэтому и первые модели цифровых ЭВМ были созданы только лишь в конце 40-х – начале 50-х годов. Большие залы были заставлены шкафами с тысячами радиоламп, киловатты электроэнергии превращались в тепло, а быстродействие машин составляло всего несколько тысяч операций в секунду. Но и это казалось чудом. Первое поколение цифровых ЭВМ – это были «мамонты» вычислительной техники, тем не менее они вполне оправдывали себя и подавали многообещающие надежды.

Как устроена ЭВМ

Любое дело мы начинаем с обдумывания. Иногда – это проблеск памяти, если работа уже знакомая, иногда – долгие-долгие раздумья, усугубляемые нерешительностью. Но вот план деятель-

ности готов, и тогда мы приступаем к делу. Точно так же и работа ЭВМ начинается с программы. Для машин первого поколения составлялись предельно подробные программы, предусматривающие каждый шаг, каждую операцию вычислений.

Посмотрим на упрощенную структуру схемы ЭВМ. Два главных ее блока изображены слева: процессор, выполняющий математические операции, и память, хранящая исходные данные и результаты каждого шага вычислений. Но главные блоки не могут работать сами по себе – ими управляет устройство, показанное вверху справа. Оно содержит тактовый генератор, определяющий ритм работы машины. Каждый импульс соответствует одному элементарному действию, например:

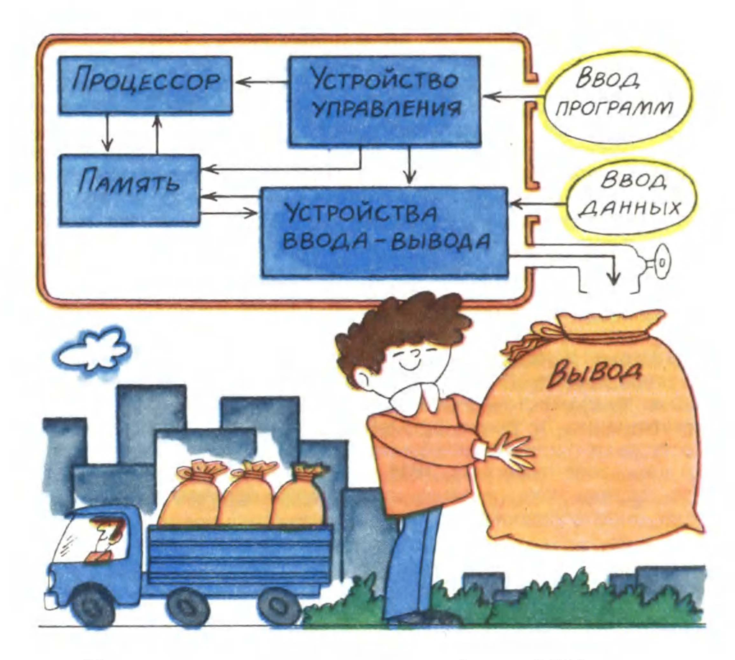
взять из ячейки памяти номер такой-то, число и передать его в процессор;

взять из ячейки памяти номер такой-то, другое число и тоже передать в процессор;

процессору: сложить числа;

результат отправить в ячейку номер такой-то, и т. д.

Обратите внимание, что мы словесно, на русском языке описали четыре шага машинной программы. Но машина первого поколения никакого языка (в том числе и русского) не понимала, кроме своего, машинного. Поэтому и программа составлялась именно на машинном языке. Описывать его не буду, поскольку программирование изучают в школах. Правда, программировать подрастающее поколение будет не на машинном, а на более общем языке высшего



Упрощенная структурная схема цифровой ЭВМ

уровня. Он значительно короче, поскольку в нем указываются только крупные операции. Перевести их на подробный машинный язык «для внутреннего пользования» сумеет сама современная ЭВМ. Но для первых ЭВМ составлялись очень подробные и потому очень длинные программы.

Делали так. Сначала в ЭВМ вводилась (загружалась, как говорят специалисты) программа и исходные данные для вычислений. Они раскладывались по ячейкам памяти, после чего можно было приступать к вычислениям. Результат выводился сначала в память, а из нее – на периферийные устройства ввода-вывода (дисплей, печатающее устройство – принтер и т.п.). Впрочем, экраны-дисплеи появились позднее, у машин второго – третьего поколений, построенных на полупроводниковых приборах, а затем – и на интегральных схемах. В первых ЭВМ обходились одним принтером.

Сразу выявился существенный недостаток описанной организации ЭВМ. Память должна была выполнять две функции: хранить исходные и полученные данные и в то же время запоминать и тут же выдавать обратно в процессор промежуточные результаты вычислений. Если для первой функции нужна память большой емкости с относительно невысоким быстродействием, то для второй – как раз наоборот: запомнить надо всего несколько чисел, но очень быстро, и также быстро их выдать. В результате у ЭВМ появилось два устройства памяти: долговременная и оперативная. Долговременная может хранить огромные массивы информации. В ней чаще всего применяется устройство магнитной записи. В больших ЭВМ они представляют собой специализированные устройства в виде стоек с большими катушками широкой магнитной ленты. А в современных микроЭВМ часто используют обыкновенный бытовой магнитофон. Наряду с веселыми песенками на кассете можно записать, как оказывается, и программу для ЭВМ. Разработаны также устройства памяти на магнитных дисках, внешне отдаленно напоминающих грампластинки, с той лишь существенной разницей, что покрыта пластинка ферромагнитным слоем и никакой звуковой канавки на ней нет, а запись ведется крохотной магнитной головкой. Использовались и магнитные барабаны, еще отдаленнее напоминающие фонограф.

Совсем не так устроена оперативная память. Поскольку главное требование к ней – высокое быстродействие, никаких движущихся частей она не содержит. Запись в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) ведется в электронные ячейки.

Четыре поколения ЭВМ сменилось за время жизни одного человеческого поколения! Любопытно, что элементная база обновлялась чаще, чем структурные схемы. Часто даже одинаковые по структуре ЭВМ выполнялись на совсем разных элементах. В 60-х годах строили машины даже на параметронах – электрически управляемых диодах с переменной емкостью. Магнитные усилители, электронные лампы, транзисторы, туннельные диоды – все это использовалось в ЭВМ. Побеждает все-таки полупроводниковая интегральная технология. Но и там был широкий выбор. Диодно-транзисторная логика (ДТЛ), транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ), логика на элементах с эмиттерной связью (ЭСЛ). А в последнее время все чаще используют совсем уже микромощную элементную базу на МОП (металл – окисел – полупроводник) и КМОП (то же, но с комплементарными парами транзисторов) интегральных схемах. И за всеми этими аббревиатурами, которые сразу и запомнить-то нелегко, стоят годы упорного труда многих сотен и тысяч людей.

Претерпела изменения и структурная схема машины. Вы, навер-

ное, заметили, что одни и те же устройства нужны для разных целей. Например, в памяти записывается и программа, и массивы данных. Возникла мысль – объединить провода, по которым циркулируют данные, команды и прочие сигналы, нужные в ЭВМ, в общие шины. Чтобы пакеты данных не путались, их снабжают «адресом» – несколькими цифрами или знаками в начале посылки. Адрес однозначно определяет, куда и зачем послан этот пакет данных. Остальные устройства, подключенные к общей шине, на эту посылку попросту не реагируют.

Описанная идея оказалась очень плодотворной. Она позволила создавать ЭВМ с гибкой структурой, наращивать число периферийных устройств (ввода-вывода), число блоков памяти, а иногда даже – и число процессоров!

Большие ЭВМ теперь имеют очень мощные процессоры, выполняющие миллионы операций в секунду. Оказалось неразумным использовать всю эту мощнось для решения какой-либо одной задачи. Ведь процессор фактически простаивает, пока идет накопление данных, обращение к памяти и тому подобные вспомогательные операции. Неопытный оператор, например, долго будет смотреть на экран дисплея, размышляя, что делать дальше. Да и опытному оператору нужно несколько секунд, чтобы осмыслить полученный результат и дать машине следующее распоряжение. В режиме диалога временны́е шкалы человека и машины просто несовместимы. Если считать по числу выполненных элементарных операций и исключить из рассмотрения такие, не совсем еще понятные явления, как интуиция, то оказывается, что машина «думает» в миллион раз быстрее.

Выход из создавшегося положения был найден. Процессор стал решать параллельно несколько задач, работая в режиме разделения времени. Пока для одной задачи накапливаются данные, решается другая, пока выводится к терминалам ее результат, снова решается первая или еще одна задача. Число терминалов ЭВМ резко возросло, одновременно возросли и вычислительные мощности.

Сейчас во всех без исключения областях человеческой деятельности используются ЭВМ. В считанные минуты они решают задачи, на которые при прежних методах понадобились бы годы упорного труда больших коллективов ученых и вычислителей. Обработка информации с помощью ЭВМ значительно повышает эффективность производства, позволяет создавать автоматизированные системы управления, освобождает людей от рутинного труда, обеспечивает информационными услугами широкий круг пользователей.

Но большие ЭВМ целесообразно устанавливать в специальных вычислительных центрах (ВЦ), где их эффективная работа обеспечивается высококвалифицированными инженерами, техниками и программистами. В то же время объекты автоматизации, конструкторские бюро, НИИ, источники и потребители информации – территориально рассредоточены и могут находиться очень далеко от ВЦ. Ну что ж, вынесем терминалы и дисплеи к потребителям! Это не так просто, поскольку терминал соединяется с ЭВМ не одним проводником! Но все-таки сделать это можно, только у потребителя надо установить аппаратуру для накопления и преобразования данных, фактически мини-ЭВМ, и организовать канал связи – канал передачи цифровой информации по двухпроводной линии или по уже имеющимся каналам связи – телефонным, радиорелейным, спутниковым – каким угодно. Именно так и делают.

Более того, большие ЭВМ объединяют в региональные или даже общенациональные сети, и пользователь зачастую даже поня-

тия не имеет, в каком уголке страны решается в данный момент его задача.

Сложилась несколько парадоксальная ситуация – исчезли как класс средние ЭВМ. Большие ЭВМ становятся все мощнее и производительнее (речь идет теперь о сотнях миллионов операций в секунду), для доступа к ним нужны сети связи, а также мини- и микроЭВМ. Но микроЭВМ имеют и огромное самостоятельное значение, решая определенные конкретные задачи на местах. И вот появилось маленькое, но очень важное устройство.

Его Величество микропроцессор

Теперь уже можно смело сказать, что микропроцессор произведет в технике столь же революционные преобразования, как в свое время транзисторы, а затем интегральные схемы. Немного об истории его появления.

К началу 70-х годов стало возможным создавать сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС), содержащие десятки тысяч транзисторов на одном кристалле. Но проектирование таких микросхем – очень дорогой и трудоемкий процесс. Ведь необходимо расположить на кристалле все транзисторы, все соединения между ними, изготовить фотошаблоны и т. д. Стоимость проектирования огромна. И если изготовить всего несколько СБИС, то стоимость золота не будет идти ни в какое сравнение с их стоимостью. Но при массовом производстве стоимость СБИС в расчете на одну выпущенную единицу резко снижается, т. е. чтобы они стали дешевле, надо их больше производить. Следовательно, надо выпускать только СБИС универсального применения, пригодные для решения самых различных задач. Этого можно добиться, если специализация СБИС будет достигаться не схемными, а программными средствами. СБИС должны быть программируемыми! Вот та радикальная идея, которая привела к появлению микропроцессоров – СБИС со структурой, аналогичной структуре ЭВМ.

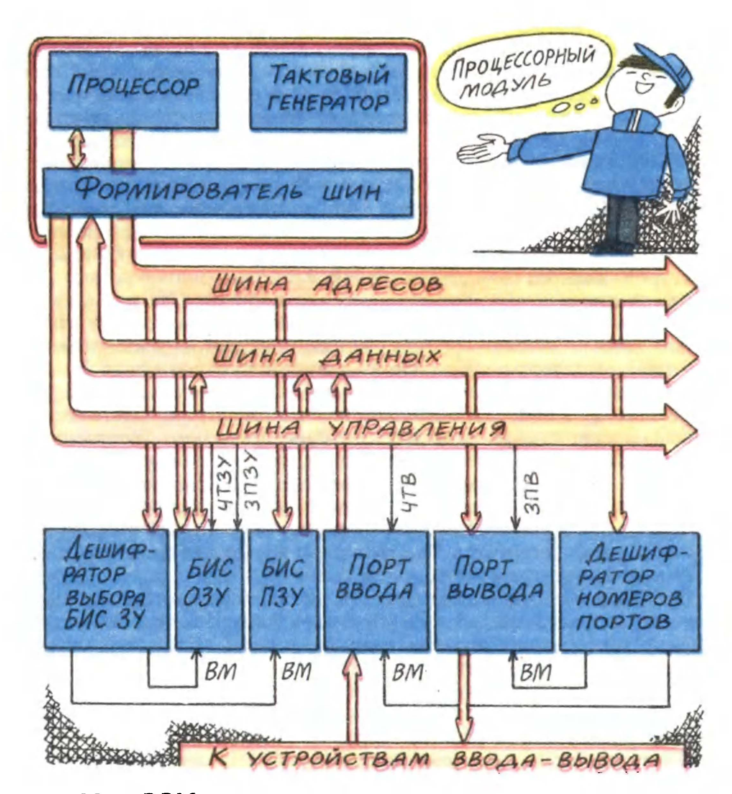
Сфера применения микропроцессоров обширна. На них можно построить микрокалькуляторы, электронные часы, настоящие ЭВМ, системы автоматического регулирования, блоки управления домашним радиокомплексом, стиральной машиной, кухонной плитой – одним словом, чем угодно. Специализация микропроцессора для конкретных функций, выполняемых им в аппаратуре, достигается записью в его память соответствующих программ. Встроенные микропроцессоры придают разнообразным приборам, устройствам и механизмам вполне «разумный» характер. Микропроцессор – неотъемлемая часть станков с числовым программным управлением, манипуляторов и роботов, систем управления транспортными средствами, обучающих систем. Где угодно, вплоть до детских игрушек, может применяться микропроцессор.

Столь многообещающий прибор заслуживает, чтобы мы подробнее познакомились с его устройством. Внешне микропроцессор выглядит как обычная интегральная микросхема в пластмассовом или металлическом корпусе, только он чуть-чуть крупнее, да и выводов имеет больше. Его габаритные размеры измеряются сантиметрами, но бóльшую чать объема занимают корпус и выводы. В середине расположен кристалл, на котором размещены десятки тысяч транзисторов со всеми сопутствующими компонентами и соединениями. Только вдумайтесь в эту цифру: десятки тысяч транзисторов в одном корпусе!

10–647

Обратимся к функциональной схеме микроЭВМ, показанной на рисунке. Процессор и ряд вспомогательных устройств образуют процессорный модуль. В него входит также тактовый генератор, определяющий ритм вычислений, и формирователь шин, т. е. наборов соединительных проводников, объединяющих одноименные выводы всех периферийных моделей. По роду передаваемой информации различают шину данных, шину адресов и шину управления. По шинам данных передается в двоичном коде обрабатываемая информация, причем в обоих направлениях – от периферийных устройств к процессору и обратно. Информация передается в большинстве микропроцессоров восьми- или шестнадцатиразрядными числами, которые называют байтами.

К периферийным устройствам относятся прежде всего устройства памяти. Память разделяется на ячейки, имеющие каждая свой адрес. Ячейки содержат 8 или 16 (в зависимости от числа разрядов процессора) элементов памяти, например триггеров. Все ячейки объединены в одну БИС. По роду вспомогательных операций различают оперативную память – оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и постоянную память – постоянно запоминающее устройство (ПЗУ). В ОЗУ записываются промежуточные данные вычислений. Там же могут храниться и программы в случае, если



Мини-ЭВМ

микроЭВМ имеет универсальное назначение, т. е. может использоваться для различных целей. Информация в ОЗУ может записываться и считываться при работе ЭВМ, а после ее выключения теряется.

В отличие от ОЗУ из ПЗУ можно только считывать информацию. Она записана там раз и навсегда и не теряется при выключении ЭВМ. У специализированных ЭВМ в ПЗУ могут храниться программа, некоторые константы, необходимые при вычислениях. Данные закладываются в ПЗУ либо при изготовлении микросхемы, либо в процессе ввода ЭВМ в эксплуатацию.

К периферийным устройствам относятся также порты ввода и вывода, выполненные в виде 8- или 16-разрядных регистров. Они предназначены для подключения внешних устройств, различных датчиков и других поставщиков информации, клавиатуры ввода данных, устройств визуального отображения информации (дисплеев), исполнительных механизмов.

Все периферийные модули имеют входы для приема управляющего сигнала ВМ (выбор модуля). Он передается по шине адресов через соответствующие дешифраторы. В процессе работы ЭВМ в каждый данный момент этим сигналом включается только один модуль. Между ним и процессором происходит обмен информацией. Все порты имеют номера и активизируются при появлении на шине адресов кода, соответствующего их номеру. Кроме того, для включения в работу любого из периферийных модулей на шине управления должен появиться сигнал (ВМ), определяющий выбор группы модулей [порты или запоминающие устройства (ЗУ)] и направления обмена информацией, например сигнал чтения из модулей запоминающих устройств (ЧТЗУ), сигнал записи в модули запоминающих устройств (ЗПЗУ), сигнал чтения из порта ввода (ЧТВ), сигнал записи в порт вывода (ЗПВ).

Работа микроЭВМ происходит по алгоритму, определяемому программой. Программа состоит из последовательного набора команд. Каждый микропроцессор характеризуется определенной системой команд, т. е. полным перечнем элементарных действий, которые может выполнять данный микропроцессор. К ним относятся элементарные арифметические и логические операции, операции пересылки данных и т. п. Команды могут состоять из одного или двух-трех цифровых слов – байт. Первый байт любой команды содержит код операции. Он определяет число слов команды и те действия, которые должен выполнить микропроцессор. Эти сведения называют операндами.

При работе микропроцессора выполнение любой из команд, записанной в программе, начинается с чтения ее кода из ЗУ. Процессорный модуль выдает в шину адресов код адреса ячейки памяти, в которой записан код операции команды. Одновременно по шине управления поступает сигнал чтения из памяти ЧТЗУ. В результате код операции команды поступает из ячейки памяти в шину данных и считывается процессорным модулем. Микропроцессор декодирует код операции, определяет действия, которые ему необходимо выполнить, и приступает к выполнению команды. Во время ее выполнения микропроцессор может еще несколько раз обратиться к памяти для получения и записи данных или констант. После выполнения одной команды микропроцессор переходит к выполнению следующей, для чего снова обращается к памяти и вызывает из очередной ячейки код следующей команды.

Правильно и оптимально составлять программы для ЭВМ – непросто. Появилась специальная наука, занимающаяся именно этим делом, – программирование. Программисту надо очень хорошо

знать систему команд данной ЭВМ. Даже «простейший» микропроцессор, работающий с 8-разрядным кодом, может иметь до $2^8 = 256$ различных команд. Разумеется, запомнить более 200 команд, представленных 8-разрядными двоичными числами, не может даже самый талантливый программист.

Для облегчения программирования каждому коду команды ставится в соответствие мнемоническое название (мнемоника) команды. Мнемонический код команды является сокращением английских слов, описывающих ее действие. Набор мнемонических кодов образует язык, на котором и ведется программирование. Создано уже много языков программирования, например Алгол, Фортран, Паскаль, Кобол, Бейсик. Каждый из них обладает теми или иными достоинствами при решении определенных задач. Для микроЭВМ программисту достаточно иметь под руками программу перевода мнемоники команды в ее код операции. В больших ЭВМ подобные программы заложены в отдельном модуле машины, так называемом трансляторе. Достаточно набрать на клавиатуре дисплея мнемонику команды, и транслятор сам переведет ее в код операции, который оператору знать уже совсем не обязательно.

Вот, например, как происходит диалог оператора с ЭВМ на языке Фортран. Человек набирает на клавиатуре дисплея общеизвестное обращение HELLO. ЭВМ по этому обращению выполняет ряд команд, которые нас уже не касаются, но подготавливают машину к диалогу с нами. Следующее обращение, набираемое человеком, SYSTEM FORTRAN. Оно означает, что разговор (диалог) будет происходить на языке Фортран, и транслятор подготавливается к принятию команд на этом языке. Далее надо дать знать машине, с кем она имеет дело, поскольку пользователей у большой ЭВМ может быть много и работать они могут одновременно. Человек набирает NEW III или NEW SSS.

Слово «NEW» здесь означает, что работает новый (для машины) пользователь, а следующие три буквы – его инициалы: Иван Иванович Иванов (III) или Семен Семенович Семенов (SSS). Вы можете выступать, разумеется, и под другим зашифрованным именем. Машине это безразлично, она будет знать вас таким, каким вы ей назоветесь. Теперь ЭВМ готова работать с вами, и она распечатывает на экране дисплея столбик номеров, которые вы должны заполнить командами и исходными данными.

Но я вовсе не собираюсь учить вас сейчас программированию. Наша задача в другом. Рассказав о сегодняшнем состоянии дел в области мини-, микро- и больших ЭВМ, пора подумать и о перспективах.

Чем меньше, тем быстрее!

Лет десять-пятнадцать назад конструкторы, всеми силами боровшиеся за повышение быстродействия ЭВМ, увидели некий «физический предел», превзойти который, казалось бы, невозможно. Дело в том, что ЭВМ второго поколения, построенные на дискретных элементах (транзисторах, диодах) или интегральных микросхемах с малой степенью интеграции (транзисторные и диодные сборки, отдельные логические элементы), имели все еще внушительные размеры. А сигналы проходят по соединительным проводникам с определенной скоростью, в любом случае не большей, чем скорость света. Этот факт установили еще до создания теории относительности.

Пусть машинный зал имеет длину 15 м, а сигналы распростра-

няются (примем идеализированные условия) по прямым проводникам со скоростью света. Тогда, чтобы сигналу пересечь весь зал и вернуться обратно, понадобится около 0,1 мкс. Если принять это время за время выполнения одной операции, то скорость работы ЭВМ составит не более 10 млн. операций в секунду. На самом деле скорость будет намного ниже, поскольку необходимо еще время для переключения логических элементов, записи-считывания и т. п.

Сейчас проблема уже не стоит так остро, поскольку размеры ЭВМ все уменьшаются. Описанная в предыдущем разделе микро-ЭВМ с микропроцессором и периферийными модулями уже выполняется на одном кристалле размером не более нескольких сантиметров (вместе с выводами). Ее быстродействие определяется лишь инерционностью транзисторов. Так развитие элементной базы опровергло выводы, казавшиеся фундаментальными.

Одновременно с микроминиатюризацией снижается и потребление энергии логическими элементами микросхем. И это имеет вполне разумное физическое объяснение. Переключающий транзистор срабатывает тем быстрее, чем быстрее происходит перезарядка емкости, нагружающей его коллекторный переход. Она состоит из емкости самого перехода, емкости соединительных проводников и емкости электродов других транзисторов, подключенных к данной точке. С уменьшением размеров как транзисторов, так и проводников емкость существенно уменьшается. При этом требуется меньший ток для ее перезарядки в течение того же самого времени.

Начиная с 1960 года за каждые пять лет минимальные размеры элементов интегральных схем уменьшались в два раза, и сейчас они достигли 4 мкм. Поговаривают о достижении оптического предела, возникающего при фотолитографическом процессе изготовления микросхем. Ведь оптическое изображение в принципе не может иметь детали мельче, чем длина используемой световой волны (около 0,5 мкм). Этому мешает явление дифракции, не позволяющее получать резко очерченные контуры. Внутренняя задержка сигналов в транзисторах микросхем, имеющих очень тонкую базу, приближается к одной наносекунде (1 нс $= 10^{-9}$ с). Столь малые размеры элементов позволили создать очень сложные СБИС. За 15 лет сложность микросхем неимоверно увеличилась.

Скорость увеличения емкости ЗУ также очень высока. Если в 1978 году изготавливались кристаллы оперативной памяти емкостью 16К байт, то сейчас речь идет о памяти емкостью до 250К. Кстати, букву К надо объяснить. Это не приставка «кило», означающая увеличение в 1000 раз (вспомните килограмм, километр), но по значению очень близка к ней. Число 1000 в двоичной системе выражается плохо, а вот $1024 = 2^{10}$ – очень удобное число. Поэтому 250К байт означает $250 \cdot 1024$ байт.

Теперь интенсивно развивается технология изготовления новых типов ЗУ, использующих другие принципы. Например, на ПЗС – приборах с зарядовой связью. Основа ПЗС – линейка полевых МОП-транзисторов с изолированными затворами. Окисел служит хорошим изолятором, поэтому на затворе каждого транзистора заряд может храниться очень долго (часами). В зависимости от знака или величины заряда данный транзистор может быть либо открыт, либо закрыт (состояние 0 или 1). Транзисторы в линейке расположены так тесно и хитро, что, когда на общую шину линейки подается тактовый импульс, заряд с затвора одного транзистора передается на затвор следующего, и т. д. Получается готовый регистр сдвига, в который можно записать и поразрядно считать двоичное «слово» любой длины.

Вместо магнитной памяти на ферритовых кольцах с 1977 года начали использовать ЗУ на цилиндрических магнитных домéнах. В этих устройствах каждая ячейка памяти имеет микроскопические размеры, и плотность записи получается очень высокой. Емкость одного кристалла памяти может достигать 100К бит. Еще большие, поистине фантастические возможности в области устройств памяти открывает использование оптических средств.

Революция без бумаги

Сло́ва, стоящие в заголовке раздела, сказал в 1978 году А. Е. Коукелл, директор Института научной информации в г. Филадельфия (США). Что же за революцию он имел в виду? Вполне мирную революцию в области информационных систем. Традиционно в них используется бумага как основной носитель информации. Но времена меняются, и при современном развитии электроники можно говорить уже и о чисто электронных информационных системах. Что это такое? Человеку, а теперь уже и создаваемым им техническим устройствам, например роботизированным комплексам, для ориентации в среде необходима информация. Причем точность принятых решений зависит в первую очередь от полноты и необходимой информации и скорости ее получения. Пока водитель автомобиля имеет полную информацию об обстановке на дороге, авария маловероятна. Опасность его подстерегает, если он чего-то не заметил, т. е. не получил необходимой информации.

Говорят, что сейчас любая техническая новинка разрабатывается в различных местах не менее четырех-пяти раз. Где-то не знают, что нужная разработка уже сделана, и делают все еще раз. Это называется «изобрести деревянный велосипед», и легко представить, в какую копеечку такое изобретение обходится народному хозяйству. А происходит все из-за недостатка информации или недостаточно быстрого обмена ею. В нашей лаборатории сидит человек и листает пухлые тома справочников, разыскивая данные нужного ему транзистора. Знакомая картина? А не лучше ли было получить данные о любом электронном компоненте на экране дисплея?

Название новой фундаментальной науки – информатики – появлялось, по крайней мере, дважды. Сначала им обозначили научную дисциплину, связанную с научно-технической информацией, а через нее – с системами накопления и поиска информации в виде печатных источников и документов. Затем термином «информатика» обозначили науку об ЭВМ и их применении. Теперь под информатикой понимают науку, изучающую общие процессы передачи и обработки информации. Технической основой информатики являются современная вычислительная техника и процессы обработки информации с помощью ЭВМ. Информатика сейчас проникает и в чисто описательные науки, такие как биология, медицина, социология. Сейчас ее ведущая роль в народном хозяйстве уже ни у кого не вызывает сомнения. Свойства научно-технического прогресса таковы, что объем научной информации в мире удваивается каждые пять лет. Только вдумайтесь в эту цифру - удваивается! Мы, как слепые котята, барахтаемся в огромном океане информации. Здесь, как нигде более, нужна помощь технических средств. Никому ведь не приходит в голову переплывать океаны на утлой весельной лодке. Правда, иногда мелькают в печати сообщения о смельчаках, переплывших океан на чем-то очень примитивном, вспомните Алена Бомбара. А в океане информации мы все уподобляемся им, поль-

зуясь примитивными средствами – тетрадкой и авторучкой. И тратим месяцы на переход, тогда как люди летают через океан на самолетах!

Следует ожидать, что электронные системы информации будут внедряться в первую очередь на промышленных объектах, НИИ, крупных библиотеках и других хранилищах информации. Но то, что нас окружает в быту: книги, речь, рисунки – тоже источники информации, ибо все они так или иначе воспринимаются нами.

Со временем информационный терминал будет на каждом рабочем месте и в каждой квартире. Такое универсальное информационно-связное оборудование можно было бы сделать уже сейчас, но пока это и сложно, и дорого.

Уже сейчас за рубежом ряд издательств научной литературы испытывает трудности. Число индивидуальных подписчиков на журналы резко сокращается с ростом цен, а библиотекам урезается бюджет из-за уменьшения числа читателей. Эффективность использования периодических научно-технических изданий постоянно уменьшается, поскольку журналов – масса и специалисту просмотреть все публикации по его профилю просто некогда. Объем научно-технической информации в мире возрастает за год на 7 млрд. страниц. Только в США в 1975 году было опубликовано 327000 статей в 4175 научных и технических журналах, а во всем мире число статей перевалило за миллион. В то же время за 15 лет, предшествовавших 1975 году, цены на журналы в среднем возросли в четыре раза.

Повышение цен на печатные издания отчасти объясняется тем, что в издательской деятельности все шире используется сложное электронное оборудование. Текст рукописей обрабатывается на ЭВМ и в окончательной форме записывается на перфоленту, гибкий диск или магнитную ленту. А с них, опять-таки с помощью сложного оборудования, осуществляется печать на бумагу.

Электронная система подготовки журнальных статей в наиболее совершенной форме включает автора, рецензента, редактора, имеющих свои терминалы и объединенных сетью передачи данных с ЭВМ. Осталось только подключить к сети еще и читателя, чтобы создать полностью «электронный журнал». Отредактированные и готовые «к печати» (без бумаги) статьи будут храниться в памяти ЭВМ, и любой читатель сможет «вызвать» на экран своего дисплея нужную ему статью.

Примерно то же самое можно сделать в больших библиотеках и информационных центрах. Уже сейчас часть информации хранится не на бумаге, а в виде микрофильмов и микрофишей – плоских пленок, напоминающих слайды. Читатель, придя в зал, не листает книгу, а смотрит на экран фильмопроектора. Но выдаются микрофильмы пока еще вручную. Представим себя в полностью «электронной библиотеке». Например, вы желаете узнать, что изобрели в тех или иных странах в области автоматических выключателей приемников при передаче неинтересных программ. Пусть вам, так же как и мне, неизвестно, есть ли такие выключатели вообще и к какому классу изобретений они относятся. Усевшись за пульт дисплея, вы вызываете на экран каталоги и выбираете нужный класс, подкласс и группу. Скорее всего это сделает за вас ЭВМ, если сумеете (проблема общения с ЭВМ!) объяснить ей, что вы хотите. Просматривая патенты, за несколько минут вы получите полное представление об успехах в этой области, а на нужные патенты, опять же нажатием кнопки, закажете копии. Сейчас вы должны были бы просмотреть не один справочник и каталог, а потом долго

рыться на стеллажах с описаниями изобретений. Если к этому добавить, что, имея терминал, подключенный к сети передачи данных, всю описанную «электронную работу» вы могли бы сделать не выходя из дома, станут ясны преимущества электронных систем информации.

«Электронная почта» и «пакетная» связь

Все началось, по-видимому, с биржевого телеграфа, изобретенного Эдисоном. Чрезвычайно занятым погоней за прибылями дельцам было весьма желательно знать текущий курс акций не выходя из собственной конторы. Сведения с биржи передавались по телеграфу и печатались терминалом (употребим современное название), установленным в конторе, на бумажной ленте. Сейчас передача кредита между различными банками осуществляется с использованием сети связи. Эта частная сеть объединяет банки США, Канады и Европы. Разумеется, и все финансовые расчеты внутри банков ведутся с помощью ЭВМ. За рубежом неоднократно высказывалось мнение, что в будущем общество будет обходиться без наличных денег, так как их заменят магнитные карты, уже сейчас широко используемые для оплаты товаров, купленных в магазинах. На карте цифровым кодом записан номер вклада покупателя в банке, и с помощью сети связи в считанные секунды можно получить сведения о кредитоспособности покупателя.

Кроме финансовой требуется передавать массу другой цифровой информации – отчеты предприятий, планы их деятельности, статистические данные и т. п. Казалось бы, можно просто позвонить по телефону, чтобы сообщить эти сведения. Но телефон оказался в этом случае не самым оптимальным устройством. По данным США, на 100 деловых телефонных вызовов приходится только 13 разговоров (абонент вышел, на совещании, в командировке или занят более важным делом). Телефон отвлекает людей от их насущных занятий и совсем не годится, когда текстовой и цифровой информации надо передавать много.

Появился телекс, а затем телетекс – системы передачи буквенно-цифровой информации, построенные по абонентскому принципу так же, как и телефон.

Для передачи графической информации служат системы, использующие факсимильный (как в фототелеграфе) принцип передачи («Телефакс», «Датафакс»).

Оконечные устройства сетей передачи данных называют терминалами. Число устанавливаемых на предприятиях и в организациях терминалов ежегодно удваивалось в течение 60-х годов. В 70-х и 80-х годах рост числа терминалов несколько замедлился, и связано это не с уменьшением объема передаваемой информации, а с ее предварительной обработкой с помощью мини-ЭВМ, установленных у абонентов.

Поздравить приятеля с днем рождения можно, послав ему телеграмму или позвонив по телефону. В первом случае это займет некоторое время, а во втором вы просто можете не застать приятеля дома. Если же и у вас, и у него установлены терминалы, входящие в сеть передачи данных, вам остается только набрать текст и «отослать» его в наиболее подходящее время.

Одна из форм «электронной почты» начала действовать в Великобритании. Пользователи системы «Видеотекс» могут обмениваться текстовыми сообщениями с помощью собственных тер-

миналов. Эта же система позволяет пользователю вызвать на экран обычного бытового телевизора архивную информацию, хранящуюся в памяти ЭВМ. Набрав телефонный номер, пользователь обращается к ЭВМ и далее нажатием кнопок дает команду на передачу страниц. Команды передаются по обычной телефонной линии со скоростью 75 бит/с, а передача страниц ведется от ЭВМ к пользователю со скоростью 1200 бит/с. Количество хранящихся в памяти страниц может составлять несколько миллионов. Исходная информация поступает в память ЭВМ от множества различных организаций. Предварительный отбор информации пользователем ведется из десяти более емких информационных единиц путем простого нажатия кнопок. Таким образом, после шести отборов можно вызвать одну страницу из миллиона возможных. Можно получить и графическую информацию, причем многие изображения и символы уже будут записаны в ПЗУ терминала у пользователя. Они вызываются на экран принимаемыми данными.

В США «электронная почта» работает на базе сети ARPANET. Пока стоимость пересылки «электронных писем» высока и составляет около 50 центов. Возможно, поэтому, а скорее, в силу привычки большинство людей пользуются услугами обычной почты. Но деловой мир уже предпочитает, где это только возможно, пользоваться электроникой.

Сети передачи данных сначала действовали на базе имеющихся широко разветвленных телефонных сетей. Но по мере увеличения объема пересылаемой информации пропускная способность телефонной сети оказывается недостаточной. В густонаселенных районах стали использовать сети кабельного телевидения. Что это такое? Обычное телевидение, только сигналы передаются не через эфир, а по кабельной сети. Хотя устройство сети обходится дорого, это лучше, чем лес телевизионных антенн на крышах домов в больших городах.

Собственно, в каждом подъезде наших домов есть сеть кабельного телевидения в миниатюре. Она начинается у коллективной антенны и кончается разветвлением на самом нижнем этаже. Но если все пользователи соединены кабельной сетью, то по ней можно передавать и сообщения, причем в обоих направлениях, используя частотные каналы, не занятые телевидением. Все чаще строятся и специальные цифровые сети для обмена информацией между ЭВМ. Для сетей связи необязателен кабель. Можно использовать и вол-

Характеристика каналов связи

Канал связи	Пропускная способность Гц	Число телефонных каналов	Число телевизионных каналов
Симметричный кабель	$5 \cdot 10^6$	500	1
Коаксиальный кабель	$3 \cdot 10^8$	30000	30
Наземный СВЧ канал	10^9	10^5	100
Спутниковый канал	10^9	10^5	100
Волоконно-оптический канал	10^{12}	10^8	10^5

новоды, и радиорелейные линии, работающие на СВЧ, и спутниковые каналы. В таблице приведены сравнительные характеристики различных каналов. Первым стоит обычная двухпроводная телефонная линия, имеющая наименьшую пропускную способность. А в последней строке приведены совсем уж фантастические данные для волоконной оптической линии, рассказ о которой еще впереди.

Но как же сообщения, переданные в сеть связи, находят нужный терминал? Ведь терминалов подключено к сети тысячи, а то и больше? А как находит телефонный звонок нужного абонента? Мы набираем номер! А как находит письмо адресата? На конверте написан адрес! А как находит сигнал считывания в ЭВМ нужную ячейку памяти? В нем содержится код ячейки. Все точно так же происходит и в сети связи. Каждый «пакет» информации снабжается «адресом» – цифровым кодом, расположенным перед посылкой. На входном порте каждого терминала установлен дешифратор, «читающий» все адреса циркулирующих в сети сигналов: «Это не мне, это не мне, стоп! Мой код!». Тут же включается регистр памяти, который и считывает передаваемое сообщение. А на все остальные «пакеты» терминал просто не реагирует. Если учесть, что скорость передачи сигналов в сети огромна, то оказывается, что для передачи «электронного письма» от момента его «написания» до прочтения корреспондентом требуется не более нескольких минут. И при всем при том корреспондент может находиться как в соседней квартире, так и на другом конце земного шара! Вот какие чудеса открывает перед нами вычислительная техника! Однако возникает вопрос: как-то мы будем жить в будущем «электронном мире» без бумаги, без почты и без денег? Интересно и жутковато, но не будем заранее пугаться. Все это наступит не так уж скоро и не сразу, так что постепенно привыкнем. Человек ведь ко всему привыкает.

Разговор с ЭВМ

Роботы, говорящие «механическим» голосом, уже прочно вошли в книги и появились на киноэкране. Заставить ЭВМ говорить сравнительно несложно. Словарный запас она запомнит, и он наверняка будет больше, чем у людоедки Эллочки из известного романа И. Ильфа и Е. Петрова. Звукогенератор тоже можно сделать, и он будет управляться цифровым сигналом с выхода ЭВМ. Голос получится очень ровный, лишенный всякой эмоциональной окраски. Научить машину эмоциям – задача очень сложная, если не сказать невозможная. А вот научить разговаривать ее не «механическим», а вполне человеческим голосом можно.

Микроэлектронный синтезатор речи, «говорящая» СБИС, устроен следующим образом. Часть кристалла отведена под ПЗУ, в которое раз и навсегда занесена информация, полученная преобразованием в цифровой код аналоговых сигналов, соответствующих словам и отдельным фразам, произнесенным диктором перед микрофоном. Эта информация и образует словарный запас синтезатора. При работе ЭВМ наступает момент, когда надо произнести фразу, т.е. выдать результат в «речевом» виде. На кристалле синтезатора расположены дешифратор и счетчик адресов. Они получают команду от ЭВМ, и содержимое соответствующих ячеек памяти поступает на цифро-аналоговый преобразователь, выполненный на том же кристалле. Цифровой код превращается в аналоговый звуковой сигнал и звучит в громкоговорителе.

В зависимости от назначения синтезатора в ПЗУ запоминается

либо набор числительных (например, в БИС для часов с устным объявлением времени или при необходимости вывода только цифровой информации), либо набор фонем. Фонема – это элементарный звук речи, соответствующий слогу или одному звуку. В этом случае синтезатором речи управляет специальный микропроцессор, «собирающий» из отдельных фонем слова и фразы. Такие системы уже сегодня используют для вывода данных на терминалах. Словарь и язык, на котором «разговаривает» кристалл, можно изменить, применив ПЗУ с другим набором слов и фонем.

Значительно более сложная задача – заставить машину «понимать» слова, произносимые оператором. Но и здесь достигнуты определенные успехи. Наиболее простой путь состоит в следующем. На этапе «обучения» оператор произносит ряд слов и фраз, которые преобразуются в последовательный двоичный код и запоминаются в ЗУ. Им в соответствие ставятся определенные команды или данные, которые также запоминаются. При работе речевого терминала любая фраза, произнесенная оператором, также превращается в двоичный код и сравнивается с содержимым памяти. Если обнаруживается совпадение, терминал выдает команду, соответствующую произнесенной фразе.

Таким образом, машина «учится» почти безошибочно работать со «своим» оператором, голос которого она уже «знает» и хранит в памяти. Трудности начинаются, когда одна и та же команда произносится различными людьми, разными голосами и в различном темпе. В этом случае распознавание возможно, но лишь на общих признаках, присущих данной фразе. Здесь мы вплотную соприкасаемся с целой проблемой – распознаванием образов. Образ может быть звуковым, видимым (оптическим), электронным и т. д. В любом случае образ можно закодировать путем развертки или иным способом и предложить машине для распознавания в виде двоичного кода.

Выделение общих признаков из множества предложенных образов или сигналов осуществляется путем фильтрации. Последняя выполняется во временнóй, частотной или пространственной области. До последнего десятилетия в радиотехнике использовался преимущественно один вид фильтрации – частотная с помощью аналоговых



Говорящая ЭВМ

фильтров. Такой фильтр пропускает одни частоты спектра сигнала и задерживает другие. Оказывается, то же самое может сделать и ЭВМ, превратив предварительно сигнал в поток цифровых данных. В этом случае фильтрация представляет собой обработку сигнала по заданной программе. Характеристики цифрового фильтра легко изменять, изменяя программу. Возможности цифровой фильтрации оказались огромными. Один случай – распознавание слов и фраз – мы уже упомянули. Но точно так же можно распознавать изображения, скажем сравнивать изображение на фотокарточке с оригиналом, изображение местности с картой. Смазанный и нечеткий снимок можно превратить в четкий, а зашумленную фонограмму избавить от шумов. Таким способом были восстановлены, например, многие старинные граммофонные записи. В последнем случае используют адаптивные фильтры, параметры которых изменяются в соответствии с сигналом.

Перечень областей применения цифровой обработки сигналов компьютерами можно продолжать до бесконечности, но мне кажется, что читатель несколько утомлен перечислением открывающихся перспектив, и поэтому на некоторое время попрощаемся с ЭВМ, сказав ей через речевой терминал: «До свидания!», и перейдем к другой теме. Машина же, проанализировав ситуацию, ответит что-нибудь, что в переводе на человеческий язык прозвучит как: «Куда вы от меня денетесь? Ведь в любой области науки и техники вам теперь без меня не обойтись». И нам волей-неволей придется с этим согласиться.

11. КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

В этой главе вас ожидает рассказ о видимых и невидимых лучах, о светящихся кристаллах, о красном луче, позволяющем разговаривать тысяче человек, и о тоненькой ниточке, по которой все сказки «Тысячи и одной ночи» можно передать за несколько минут, о том, как составляют карты и следят за спутниками, а также о многих-многих других возможностях, открываемых нам этой молодой и удивительной техникой – оптоэлектроникой.

Что это такое?

Оптоэлектроника – это сплав, синтез оптики и электроники. Она занимается вопросами совместного использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации.

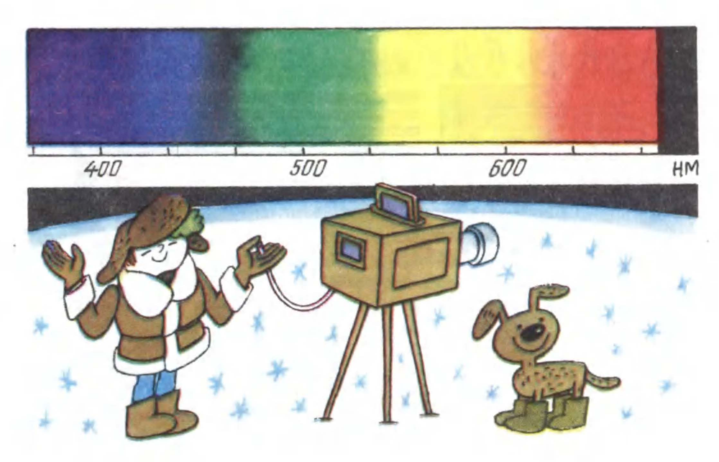
Давно прошло время, когда единственными источниками света были Солнце, Луна, звезды и костры, а единственным имеющимся в нашем распоряжении приемником света – собственные глаза. Естественные источники излучают некогерентный свет – электромагнитные волны с различными частотами, хаотически изменяющимися фазами

и всевозможной поляризацией. Такой же свет дают и различные электрические светильники: лампа накаливания, газосветная трубка, вольтова дуга. Некогерентный свет не удается сфокусировать в достаточно узкий и тонкий пучок – луч хотя бы потому, что источник имеет конечные размеры, причем далеко не малые по сравнению с длиной волны.

Но как же так, спросит читатель, раньше мы говорили, что чем больше размеры излучателя электромагнитных волн – антенны, тем у́же его диаграмма направленности. Это верно, но при условии, что волны, излучаемые разными участками источника, когерентны, т. е. имеют одинаковую частоту и постоянный сдвиг фаз. Тогда излучение отдельных участков источника складывается в главном направлении, формируя узкий луч. Некогерентные источники не обладают таким свойством, и сложения волн не происходит. Разумеется, удается в определенной мере сфокусировать лучи и некогерентных источников. Примером тому служит обыкновенный прожектор. Но расходимость его луча остается значительной, и высокой концентрации энергии в луче не получается.

Эпоха когерентной оптики наступила с изобретением оптического квантового генератора – лазера. Он открыл невиданные прежде возможности и в оптоэлектронике. Приведу лишь некоторые примеры. С помощью лазерного локатора (лидара) расстояние до Луны можно определить с точностью до нескольких сантиметров. Мощные лазеры способны «прожигать» толстые стальные листы. В современной геодезии многие работы (нивелирование, определение координат опорных пунктов) производятся с помощью лазерных оптоэлектронных приборов. Оптические устройства голографической памяти способны хранить на пластинке (микрофише) размером не более обычного кадра на кинопленке несколько мегабайт цифровой информации.

Оптоэлектронные приборы могут работать в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. Освоенной областью считается диапазон длин волн излучения от 0,2 до 50 мкм. Физическую основу оптоэлектроники составляют процессы преобразования оптических сигналов в электрические и наоборот – электрических в



Видимый участок электромагнитного спектра

оптические. Оптоэлектроника изучает также процессы распространения излучения в различных средах и взаимодействие излучения с веществом. Оптоэлектроника примыкает к ряду дисциплин, превратившихся уже в целые научные направления. Сюда относятся квантовая электроника, полупроводниковая электроника, физика твердого тела, голография, нелинейная оптика и многие другие.

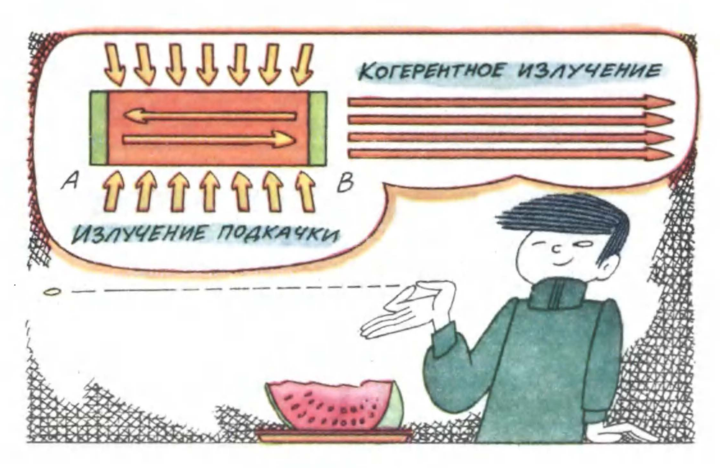
Большинство оптоэлектронных приборов содержит в своем составе генераторы и приемники излучения. К их описанию мы и перейдем.

Лазеры

Теоретические основы оптического квантового генератора разработали советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, а также независимо от них американцы А. Шавлов и У. Таунс. За свои открытия они были удостоены Нобелевской премии. Первый работающий лазер на рубине продемонстрировал Т. Меймен (США) в 1960 году.

В лазере излучают атомы вещества – рабочего тела лазера. Рабочее тело может быть и твердым, и жидким (очень редко), и газообразным. Чтобы атомы излучали, их надо прежде всего возбудить, т. е. сообщить им энергию. В твердотельных лазерах для этого служит оптический генератор накачки – импульсная лампа-вспышка большой мощности. Ее трубка расположена рядом с рабочим телом – кристаллом рубина или неодимового стекла. Твердотельные лазеры, как правило, импульсные, так как при той мощности оптического излучения, которую они генерируют (мегаватты и даже гигаватты), ни одна конструкция не выдержала бы работы более нескольких микросекунд.

В газовых лазерах плотность атомов мала, и они могут работать в непрерывном режиме при небольших мощностях излучения: около нескольких милливатт (лазер на смеси гелия и неона, He – Ne-лазер) или десятков ватт (инфракрасный лазер на углекислом газе



Лазер на твердом теле (А, В – зеркала)

CO_2). Газ этих лазеров заключен в разрядную трубку, и возбуждение атомов (накачка) осуществляется электрическим током.

Но возбудить атомы рабочего вещества мало, надо заставить их излучать синхронно, всем вместе одну и ту же волну с одной и той же поляризацией и фазой. Различают спонтанное (случайное, самопроизвольное) и вынужденное излучения. Вот последнее-то и используют в лазерах. Рабочее вещество подбирают такое, чтобы у его атомов был метастабильный (почти стабильный) энергетический уровень. Атомы, возбужденные накачкой до энергии метастабильного уровня или до еще большей энергии, остаются на этом уровне некоторое время. Если в этот момент мимо возбужденного атома промчится квант света с частотой, соответствующей энергии перехода с метастабильного на более низкий уровень, то атом совершит этот переход и излучит еще один, точно такой же квант. Это и будет индуцированное, или вынужденное, излучение. Если энергию атома на метастабильном уровне обозначить E_2, а энергию на более низком уровне E_1, то условие излучения, установленное еще Нильсом Бором, можно записать так:

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

где h – постоянная Планка; ν – частота излучения. Величина $h\nu$ является энергией кванта.

Чтобы создать все условия для интенсивного индуцированного излучения, надо значительно увеличить число квантов, распространяющихся в рабочем теле лазера. Эту задачу выполняет оптический резонатор – два зеркала, установленные строго параллельно друг другу. Вы можете сделать простой опыт с двумя маленькими зеркалами. Расположите зеркала «навстречу» друг другу и посмотрите поверх одного на другое. Вы увидите отражение одного зеркала в другом, а в том – первого, и т. д. Получится туннель из ряда зеркал, уходящий очень далеко, в туманную бесконечность. Поскольку качество бытовых зеркал невысокое, вам удастся увидеть всего семь – десять отражений. Качество зеркал в лазерах гораздо выше, и свет переотражается десятки и сотни раз. Расстояние между зеркалами подбирается с точностью до малых долей микрометра таким образом, чтобы на длине оптического резонатора уложилось целое число полуволн лазерного излучения. В этом случае поля переотраженных волн складываются, результирующая напряженность поля возрастает в сотни раз, что как раз и нужно для индуцированного излучения атомов рабочего тела. Одно из зеркал делается полупрозрачным, пропускающим несколько процентов падающей на него оптической энергии. Оно и служит выходным окном лазера.

Газовые He – Ne-лазеры получили самое широкое распространение. На рисунке показано устройство промышленно выпускаемого лазера. В отдельном корпусе расположен высоковольтный выпрямитель, подключаемый к сети переменного тока и создающий на разрядной трубке лазера напряжение 1...1,5 кВ при токе 15... 25 мА. В цилиндрическом корпусе помещена разрядная трубка с двумя зеркалами, размещенными у ее торцов. Торцы разрядной трубки закрыты окошками из оптического стекла. Они наклонены к оси трубки под углом Брюстера $\varphi_Б$. Этот угол зависит от показателя преломления стекла n: $\operatorname{tg}\varphi_Б = n$. Он обладает интересным свойством: свет, многократно проходя сквозь стеклянную пластинку, наклоненную под углом Брюстера, становится линейно поляризованным. Вот и вся конструкция.

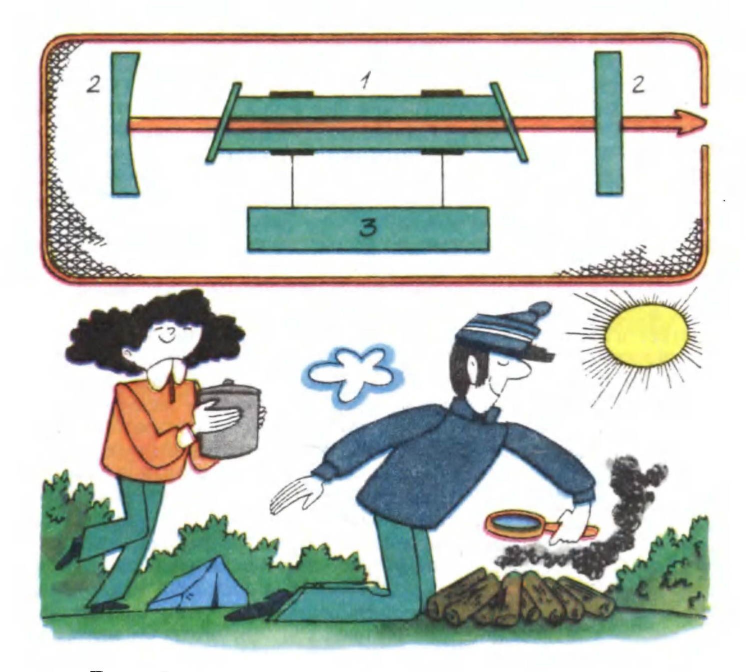
Луч лазера очень тонок и очень слабо расходится в простран-

стве. На расстоянии в один километр световое пятно, создаваемое лазером на экране, может иметь диаметр не более метра.

В то же время лазерное излучение монохроматично, т.е. содержит только одну частоту или одну длину волны. Свет He – Ne-лазера красный, а его длина волны составляет 0,63 мкм.

Излучение ИК лазеров вообще не видно, но если лазер работает в дальней инфракрасной области (ИК) спектра, как, например, лазер на углекислом газе CO_2, излучающий на длине волны 10,6 мкм, то его излучение чувствуется как тепло. Из твердотельных лазеров в оптоэлектронике наибольшее применение получил лазер на кристалле алюмоиттриевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), в кристаллической решетке которого часть атомов иттрия замещена ионами неодима (Nd). Основу лазера составляет кристалл с зеркально отполированными торцами. Кристалл освещается ксеноновой лампой-вспышкой. Лазер может работать и в непрерывном режиме. К достоинствам его относятся прочность и надежность конструкции и более высокий КПД по сравнению с газовыми лазерами. Длина волны излучения лежит в ближней ИК области спектра и составляет 1,06 мкм. Но лазер может излучать и вторую гармонику основной частоты, попадающую в середину видимой части спектра. Длина волны в этом случае составляет 0,53 мкм.

Неправда ли, описанные «большие» лазеры, хотя и очень отдаленно, напоминают радиолампы: высокие напряжения, стеклянные баллоны и т.д. Но радиотехника почти везде (кроме мощных



Газовый лазер:
1 – разрядная трубка; 2 – зеркала; 3 – высоковольтный источник питания

радиопередатчиков) стремится отказаться от радиоламп и перейти к полупроводникам. Не произошло ли что-нибудь подобное и в лазерной технике? Да, произошло! Был сконструирован полупроводниковый лазер. О нем я расскажу, но сначала несколько слов о хорошо известных вам устройствах, которые называются светоизлучающими диодами.

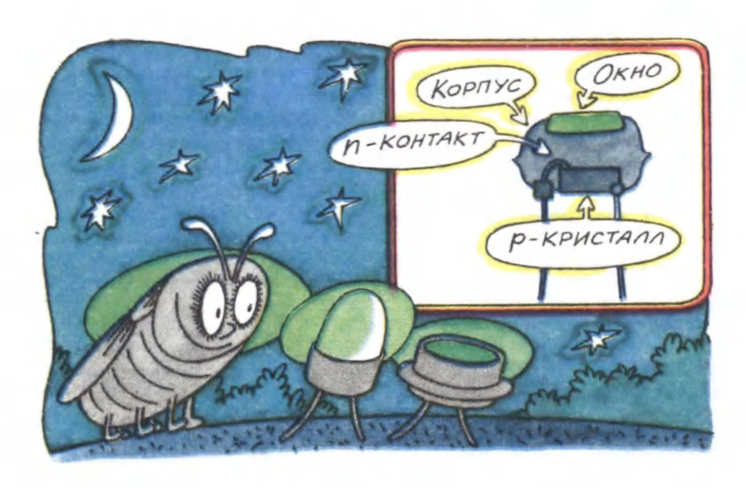
Светоизлучающие диоды

Свечение диодов в точке контакта при определенном токе через диод заметил еще в 20-х годах талантливый сотрудник Центральной радиолаборатории О. В. Лосев. Но технология изготовления практически пригодных светодиодов была разработана лишь в наши дни. Почему полупроводниковый *p-n* переход может светиться? Этот вопрос вызывает еще один, более общий: как вообще излучается свет? Излучают, как мы знаем, атомы, причем для этого их надо перевести в возбужденное состояние, соответствующее высоким энергетическим уровням. Если атомы возбуждать нагревом, то соответствующее излучение называется тепловым. Оно некогерентно. Даже нагретый гвоздь излучает в ИК области спектра. Нагревая гвоздь сильнее, мы видим, как он становится темно-красным, затем желто-соломенным. А нагретый до значительно большей температуры металл в доменной печи сияет белым или даже бело-голубым светом. Итак, с повышением температуры максимум теплового излучения смещается в сторону коротковолновой части спектра. Энергия теплового движения атомов и молекул пропорциональна температуре, и описанное явление как нельзя лучше согласуется с квантовой теорией, ведь энергия кванта обратно пропорциональна длине волны. Итак, чем больше температура, тем больше энергия квантов и тем короче длина волны излучения. Но тепловое излучение не имеет никакого отношения к светодиодам и полупроводниковым лазерам.

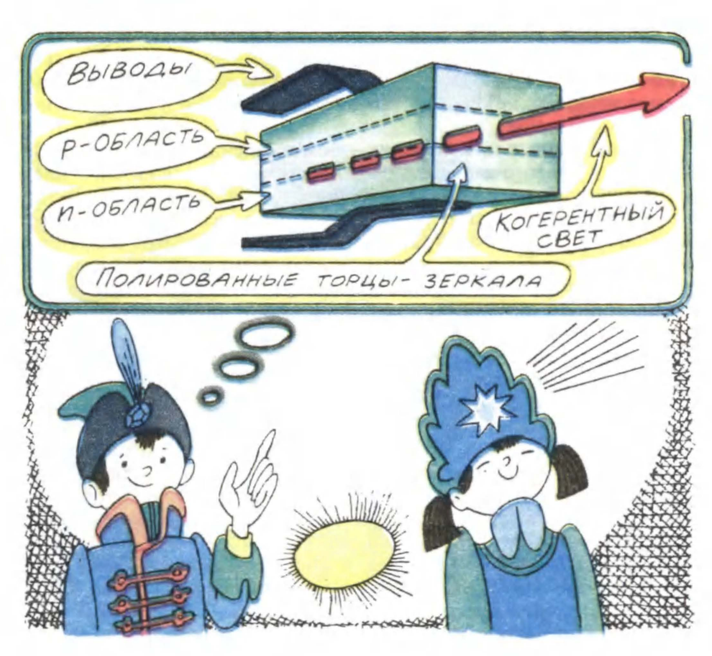
Есть еще один вид излучения – люминесценция. Его мощность превышает, и часто очень намного, интенсивность теплового излучения при данной температуре. Люминесценцию называют «холодным светом». Чтобы возникла люминесценция, необходимо внешнее воздействие нетеплового характера. Хорошо знакомый нам экран электронно-лучевой трубки светится под ударами электронов. В полупроводниковых светодиодах используется электролюминесценция – возбуждение атомов проходящим через диод электрическим током.

Возбужденные атомы полупроводника оказываются на метастабильном энергетическом уровне. Возвращаясь в основное состояние, они и излучают квант света. Если возвращение атомов в равновесное состояние происходит самопроизвольно, вне связи с внешними воздействиями, то излучение оказывается некогерентным. Так излучают обычные светодиоды, используемые как индикаторы в электронной аппаратуре. Выпускаются и семисегментные цифровые индикаторы на основе светодиодов. Они применяются в некоторых калькуляторах и часах.

Наибольшее распространение в светодиодах получили такие полупроводники, как арсенид галлия (GaAs) и фосфид галлия (GaP). Используются и тройные соединения, например GaAlAs, GaAlP и др. В зависимости от материала и технологии изготовления получают красный, оранжевый, зеленый и даже синий цвета свечения. Выпускаются и ИК излучающие диоды. Светодиоды могут иметь размеры



Светодиоды



Полупроводниковый лазер

от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Потребляемый ими ток составляет десятки миллиампер при напряжении 2...3 В. Коэффициент полезного действия светодиодов невелик, и мощность оптического или ИК излучения не превосходит нескольких милливатт.

Полупроводниковый лазер имеет такой же излучающий *p-n* переход, как и светодиод, но структура его существенно отличается. Кристалл полупроводника полируют с торцов, чтобы получить зеркальные стенки, между которыми образуется оптический резонатор. Плотность тока через *p-n* переход лазера должна быть выше, чтобы интенсивнее переводились атомы на метастабильный уровень. Далее, как и в любом лазере, благодаря оптическому резонатору происходит индуцированное излучение на одной определенной длине волны. Полупроводниковые лазеры имеют заметно худшую когерентность излучения по сравнению с газовыми и даже твердотельными. Угол расходимости светового пучка у них тоже больше. Но зато полупроводниковые лазеры имеют и неоспоримые достоинства: миниатюрность, экономичность и надежность в работе, низковольтное питание. В ряде случаев эти преимущества оказываются решающими.

Итак, мы знаем, как генерируется оптическое излучение, проще говоря – свет. Теперь надо его принять, зарегистрировать. Для этой цели служат фотоприемники.

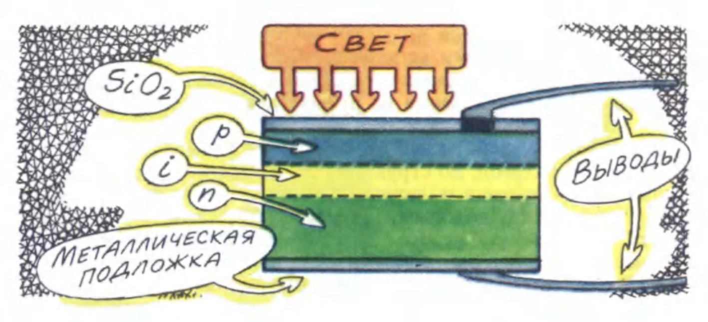
Фотодиоды и фототранзисторы

Собственно, с фотоприемниками мы уже знакомы по главе, посвященной телевидению. Вакуумные фотоэлементы и фотоумножители продержались значительно дольше радиоламп, но теперь и они уступают место миниатюрным и чувствительным кремниевым или арсенидгаллиевым фотодиодам. В полупроводниковых фотоприемниках наблюдается внутренний фотоэффект: кванты света «выбивают» электроны в атомах толщи полупроводника. Ставшие свободными электроны создают ток через *p-n* переход, который регистрируется.

Различают два режима работы фотодиодов: собственно фотодиодный и фотовольтаический. В фотодиодном режиме на *p-n* переход подается запирающее напряжение. В темноте ток через закрытый переход оказывается весьма малым. Но стоит осветить переход, как ток резко возрастет. Разумеется, за счет «выбитых» квантами света электронов и образовавшихся на их месте «дырок».

В фотовольтаическом режиме на *p-n* переход не подают напряжения – оно само возникает под действием света. Происходит это оттого, что кванты света сообщают носителям заряда дополнительную энергию, помогающую им преодолевать потенциальный барьер *p-n* перехода. «Информационные» фотоприемники, служащие для регистрации оптических сигналов, чаще всего работают в фотодиодном режиме, а солнечные батареи – в фотовольтаическом режиме, развивая напряжение в несколько десятых долей вольта на каждый элемент.

Технология изготовления фотодиодов почти не отличается от технологии изготовления обычных полупроводниковых приборов. На кристалле полупроводника методом эпитаксиального выращивания или ионного легирования создают слои с *p* и *n* проводимостями. Один вывод образует контакт с подложкой, а другой – тонкий, прозрачный для света слой металла. Параметры фотодиодов совершенствуются в двух главных направлениях: – повышение чувствительности и умень-



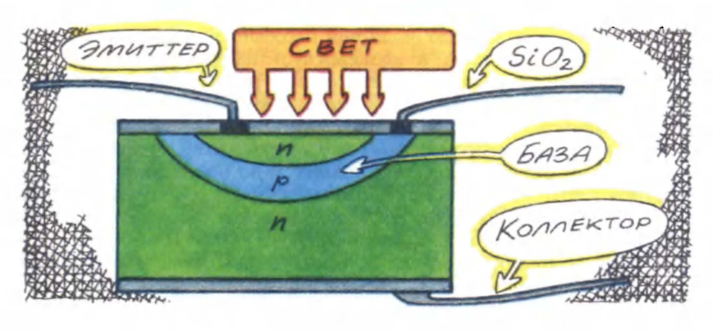
Кремниевый p-i-n фотодиод

шение инерционности. С этой целью предложен ряд новых структур: четырехслойные с гетеропереходом, фотодиоды с барьером Шотки (контакт металл – полупроводник), отличающиеся особенно высоким быстродействием, кремниевые *p-i-n* диоды, которые все более вытесняют прибор с *p-n* переходом. Структура *p-i-n* содержит слои полупроводника с *p* и *n* проводимостями, разделенные очень тонким *i*-слоем окиси кремния – изолятором. Обратный ток перехода в *p-i-n* структуре чрезвычайно мал, что увеличивает чувствительность к слабым световым потокам. Энергия носителей заряда, возбужденных квантами падающего света, оказывается вполне достаточной, чтобы преодолеть тонкий слой изолятора и создать фототок.

Фототранзистор в отличие от фотодиода обладает внутренним усилением и благодаря этому – повышенной чувствительностью. Фототранзисторы с *p-n* переходами изготавливаются по стандартной планарной технологии кремниевых интегральных схем. От обычного *n-p-n* транзистора фототранзистор отличается только тем, что у него в области эмиттерного перехода имеется прозрачное окно, пройдя которое свет попадает в базу. Образовавшиеся благодаря действию квантов света носители заряда создают ток базы. Ток коллектора в соответствии с принципом работы транзистора получается в $h_{21э}$ раз больше. Типичное значение коэффициента передачи тока кремниевого транзистора составляет 50...200.

Из других типов фотоприемников следует упомянуть фоторезисторы. Как правило, они также изготавливаются из полупроводника, но *p-n* переходов не имеют, т. е. ведут себя как обычные омические сопротивления. Темновое сопротивление фоторезистора обычно велико и может достигать нескольких мегаом. Под действием света в толще полупроводника появляются свободные носители заряда, резко снижающие сопротивление фоторезистора. Если в вашем подъезде установлен автомат включения лестничного освещения с наступлением темного времени суток, то можете быть уверены, что датчиком служит фоторезистор, обычно типа ФСК-1 или ФСК-2.

Большие трудности возникают при создании фотоприемников для ИК области спектра. Дело в том, что для «вырывания» электрона из атома полупроводника при фотоэффекте квант света должен совершить определенную работу, называемую работой выхода. Следовательно, энергия кванта должна быть больше работы выхода для данного вещества. Но энергия квантов уменьшается с увеличением длины волны. Кремниевые фотоприемники эффективно работают



Фототранзистор

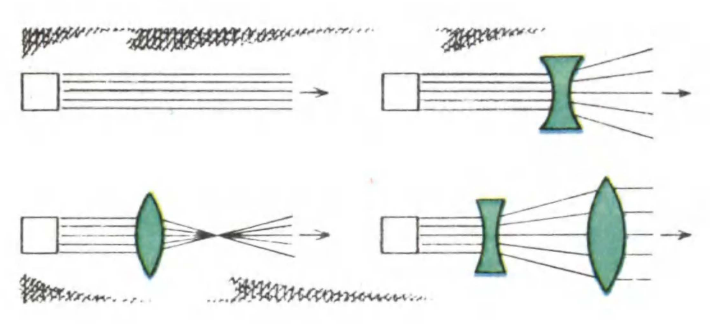
только в видимой части спектра до длин волн 0,8...0,9 мкм. Германий, а также тройные соединения, такие как InGaAs, GaAsSb, позволяют продвинуться в длинноволновую область до 2...3 мкм. А для приема в дальней ИК области (10...12 мкм) необходимо использовать уже другие физические принципы. Обнадеживающие результаты дают пироэлектрические приемники. В них используются вещества, создающие электрический заряд при воздействии тепла. Пироприемник обычно содержит и усилитель на полевом транзисторе с изолированным затвором, имеющий очень высокое входное сопротивление (гигаомы), согласующееся с высоким сопротивлением пироэлемента.

Рассмотрев способы генерации и приема оптического излучения, перейдем к устройствам, в которых используются описанные приборы.

Лидары, светодальномеры, оптроны...

Ассортимент подобных устройств огромен. Не будем заниматься их перечислением, а рассмотрим некоторые из них.

Лидар, или оптический локатор с лазером в качестве передатчика, внешне напоминает обыкновенный спаренный телескоп. Принцип действия его точно такой же, как и у известного нам радиолокатора. Импульсы мощного лазера, дополнительно сфокусированные оптической системой одного из телескопов, посылаются в направлении



Оптические системы – антенны

исследуемого объекта. Отраженный или рассеянный сигнал достигает приемной трубы-телескопа и воздействует на фотоприемник. По задержке отраженного импульса определяют расстояние до объекта, а по положению телескопов-его угловые координаты. Точность их измерения лидаром намного превосходит точность любого радиолокатора. Так, например, угловые координаты можно определить с точностью до угловой секунды, а дальность-до нескольких десятков сантиметров. Что это значит? Можно, например, на расстоянии 200 км следить за стыковкой двух космических аппаратов, сблизившихся до расстояния в несколько метров.

Следующий прибор произвел подлинную революцию в геодезии и картографии. Назначение его ясно из названия-светодальномер. Прежде чем составить подробную и точную карту местности, необходимо найти и обозначить пункты, координаты которых были бы хорошо известны. Относительно их можно определять координаты и других пунктов: улиц, домов, холмов, оврагов, рек и озер. Вы неоднократно видели на возвышенных местах ажурные деревянные или металлические башни-геодезические сигналы. Они строятся над опорными пунктами геодезической сети. С одного сигнала обязательно видно два-три других. Ранее сигналы называли триангуляционными вышками, поскольку вся сеть строилась с помощью метода триангуляции[1]. Между двумя сигналами как можно точнее измерялось расстояние, например, мерной лентой или проволокой. Это расстояние называется базисом. Затем с концов базиса определяли направление на третий пункт. Рассчитав все стороны получившегося треугольника по известной одной стороне и двум углам (классическая задача!), определяли положение третьего пункта, затем четвертого и т.д. Триангуляционная сеть уходила за горизонт, но точность угловых измерений теодолитами весьма высока, и координаты пунктов определялись довольно точно. Тем не менее ошибка накапливалась и накапливалась по мере удаления от базиса. А насколько трудоемкой была эта работа для геодезистов, вы сами теперь можете представить! Долгие месяцы вручную обрабатывались колонки многозначных цифр, измеренных в полевых экспедициях.

Радиоэлектроника упростила геодезические работы. Я уж не буду говорить, что многозначные числа обрабатывает теперь ЭВМ-это очевидно. Но и углы в триангуляционной сети теперь никто не измеряет. Измеряют длину сторон с помощью портативных и очень полезных приборов-радио- и светодальномеров. Светодальномер обеспечивает большую точность. Он позволяет измерять расстояние в 10 км с ошибкой в один сантиметр! Зато радиодальномер действует в любую погоду: туман, плохая видимость ему не помеха.

Принцип работы светодальномера несложен. Прибор содержит лазер-излучатель света, модулятор и передающую оптику. В модуляторе установлен электрооптический кристалл, изменяющий свои параметры под действием электрического сигнала. Обычно используют синусоидальный сигнал с частотой 10...150 МГц (измерительная частота). Промодулированный кристаллом лазерный луч проходит к отражателю, установленному на другом конце измеряемой трассы. Отражателями служат трипель-призмы-стеклянные призмы с тремя взаимно перпендикулярными гранями. Они обладают важ-

---

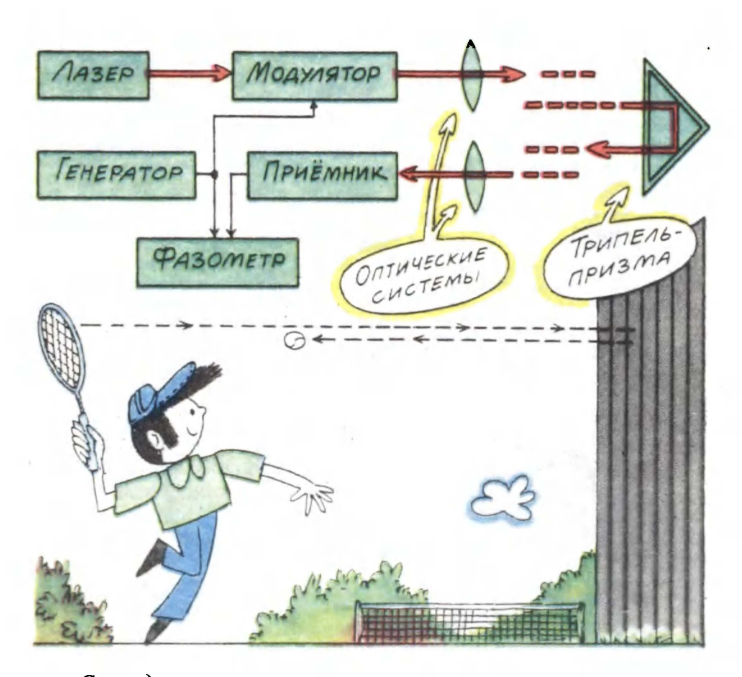
[1] *Триангуляция*-метод определения положения геодезических пунктов путем построения на местности систем смежно расположенных треугольников (вершинами их являются определяемые точки), в которых измеряют углы и длину сторон.

ным свойством зеркально отражать луч именно в том направлении, из которого этот луч пришел. Поэтому никакого наведения отражателя не требуется, надо лишь поставить его примерно перпендикулярно приходящему лучу. Трипель-призма является оптическим аналогом радиолокационного уголкового отражателя.

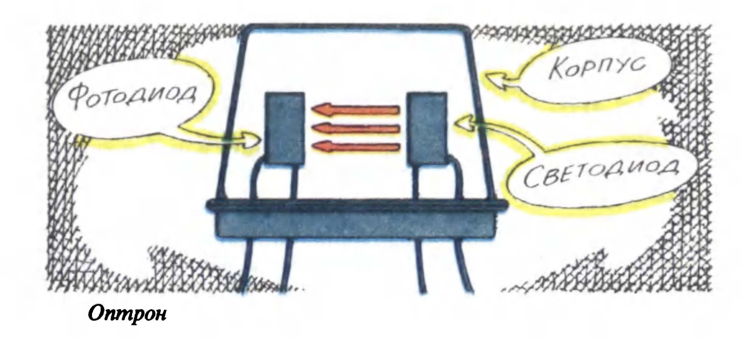
Отраженный свет попадает в приемную оптику и на фотоприемник. На выходе приемника выделяется модулирующий сигнал, но фаза его запаздывает относительно фазы сигнала в модуляторе оптического передатчика. Измерив разность фаз, можно затем рассчитать и расстояние до отражателя. В современных дальномерах это делает встроенный микропроцессор, и результат – дистанция в миллиметрах – выдается на многоразрядный цифровой дисплей.

Наконец, третий пример, оптрон. Это уже не прибор, перекрывающий большие расстояния, а элемент электронных схем. Оптрон представляет собой пару: светодиод – фотодиод, объединенные в одном непрозрачном корпусе. Выводы светодиода и фотодиода электрически не соединены друг с другом, поэтому оптрон может служить прекрасным элементом связи или развязки между электрическими или электронными устройствами. В качестве примера можно привести случай, когда нужно вывести информацию из установки, находящейся под высоким напряжением, а соединительные провода использовать нельзя из-за ограниченной электрической прочности изоляции или по условиям техники безопасности.

Конструкции оптронов могут быть самыми разными. Если высоковольтной изоляции не требуется, то весь оптрон, включая светодиод и фотодиод, выполняется в виде единой конструкции. Такие

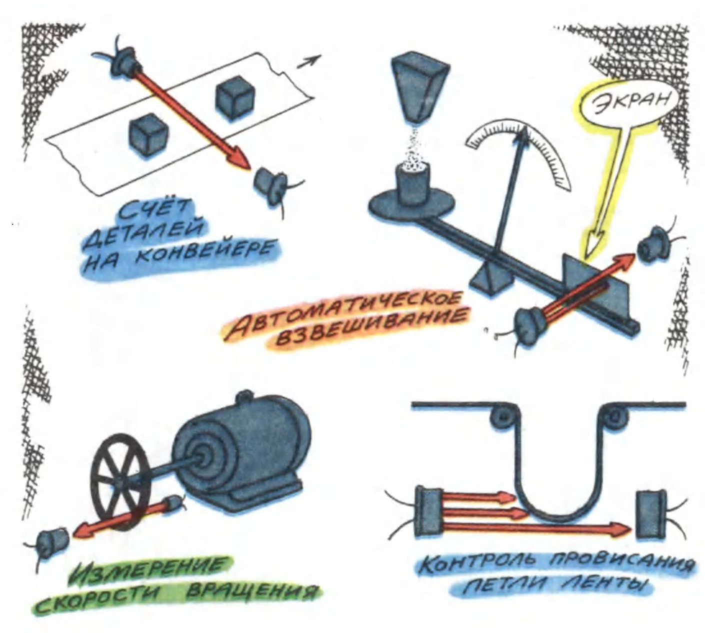


Светодальномер



Оптрон

оптроны часто используют как элементы электронных схем, например в качестве элемента связи в триггерах, мультивибраторах или операционных усилителях. Интересна конструкция оптрона с открытым воздушным оптическим каналом. Он допускает механическую модуляцию светового потока. Предположим, что требуется с высокой точностью знать частоту вращения вала. На вал насаживают обтюратор – диск с чередующимися прозрачными и непрозрачными секторами. Секторы прерывают поток света в оптическом канале оптрона, и на выходе фотодиода появляются импульсы, следующие с частотой, кратной частоте вращения. Другое применение – счет деталей на конвейере и тому подобное.



Применение оптронов

От оптрона к оптической линии связи

Однажды нашей лаборатории понадобилось изготовить только что описанный датчик скорости вращения вала. Включили светодиод, но подвели к нему питание не от источника постоянного тока, а от звукового генератора, чтобы на выходе фотодиода получить переменный звуковой сигнал, который легко усилить и измерить. Стали добиваться предельной чувствительности системы, подбирая режим элементов, схему усилителя.

А как проверить чувствительность? Очень просто: отодвигать фотодиод от светодиода. По мере совершенствования устройства добились расстояния между излучателем и приемником более метра. И тут возникла мысль: а не снабдить ли светодиод и фотодиод собирающими линзами? Нашли линзу, попробовали поставить ее на пути, да так, чтобы фотодиод оказался в фокусе. Сигнал возрос, но отодвигать фотодиод дальше не позволяли размеры лаборатории. Не беда. Посчитали теоретически. Получилось, что даже с двумя относительно небольшими линзами диаметром около 40 мм дальность действия нашего оптрона достигает километра! И вторая мысль – вместо монотонного писка звукового генератора передавать обычный человеческий голос. Разумеется, мы уподобились современным изобретателям велосипедов – светотелефон давно известен,– но зато как интересно своими руками сделать подобную конструкцию. Светотелефон был изготовлен. Каждый аппарат действовал всего от двух элементов с напряжением 1,5 В, которых хватило на целый сезон. Дальность действия не превысила, правда, полутора километров, но ведь использовались слабенький светодиод с некогерентным излучением и случайно оказавшиеся под рукой линзы.

Линии оптической связи с лазерами в качестве источников света могут обеспечивать дальность в десятки и сотни километров; практически она ограничена только поглощением света в атмосфере. Значит, в космосе..? В космосе лазерная линия связи может перекрыть миллионы километров благодаря очень малой расходимости в пространстве лазерного луча.

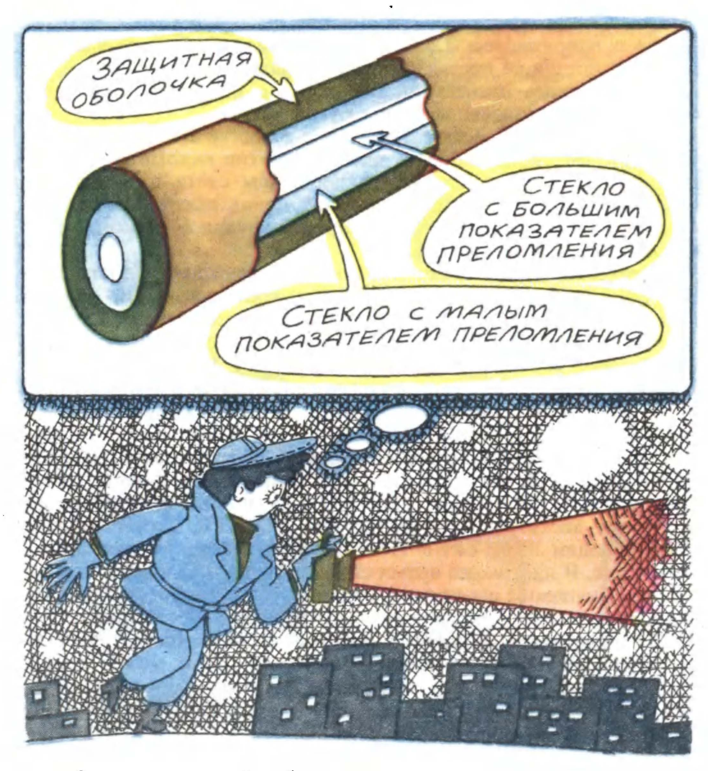
У оптической линии связи есть еще одно громадное достоинство. Любой канал связи обычно бывает узкополосным. Во всяком случае полоса передаваемых частот оказывается не более нескольких процентов частоты несущей. На частоте 10 ГГц (длина волны 3 см) в СВЧ диапазоне можно передать полосу частот 100 МГц, что примерно соответствует скорости передачи двоичной информации 100 Мбит/с. А в КВ диапазоне на частоте 10 МГц (длина волны 30 м) она не может превзойти 100 кбит/с, да и передавать полосу частот 100 кГц на КВ не позволит ни одна инспекция электросвязи.

Иное дело в оптическом диапазоне. При длине волны 1 мкм частота несущей составляет $3 \cdot 10^8$ МГц, а полоса передаваемых частот может достигать $3 \cdot 10^6$ МГц, или 3000 ГГц. Скорость передачи информации 3000 Гбит/с! Пока это фантастика, но теоретически возможная. В настоящее время скорость передачи информации в оптическом диапазоне ограничена только инерционностью фотоприемников, и пределы ее повышения практически неисчерпаемы. Это позволяет передавать огромные объемы информации. В Москве давно уже функционирует линия оптической связи между двумя высотными зданиями. Она используется как часть городской телефонной сети. Тоненький красный луч лазера переносит многие тысячи телефонных разговоров. Представляете, сколько меди, свинца и пластика оказалось возможным не укладывать под землю. Теперь мы вплотную приблизились к очень интересной теме.

Волоконная оптика

Трудно предположить, что Москву часто будет окутывать непроницаемо густой туман и лазерная линия связи перестанет функционировать. И все-таки, а вдруг? Хотелось бы иметь линию связи, совершенно не зависящую от погодных условий. Такие линии есть – это кабели. Но они дороги, на их изготовление идет масса дорогих цветных металлов, а пропускная способность все время остается недостаточной. Возникла идея пустить световой сигнал по стеклянному волокну.

Устройство стекловолоконного «кабеля» непростое. Сердцевина его имеет бо́льший показатель преломления, чем периферийная часть. А свет может преломляться в неоднородной среде в сторону среды с бо́льшим показателем преломления. В этом случае пологие световые лучи будут всегда отклоняться к центру волокна и никогда не выйдут наружу. В зависимости от технологии изготовления волокна показатель преломления может изменяться либо плавно, либо скачкообразно, если в процессе изготовления «сердцевину» волокна покрыть еще одним слоем «легкого» стекла. В этом случае свет будет испытывать полное внутреннее отражение на границе раздела слоев и опять же не сможет покинуть «сердцевину» стекловолокна.



Световолоконный кабель

Стекловолокно можно сделать очень тонким, теоретически до половины длины волны, т. е. 0,25 мкм. Промышленно выпускаемые волокна значительно толще, диаметр их составляет доли миллиметра. Тем не менее стеклянное волокно такого диаметра оказывается гибким и легко наматывается на катушку. Снаружи волокно покрывают слоем полиэтилена для защиты от механических повреждений. Торцы стекловолокна шлифуют. И к ним присоединяют светодиод или полупроводниковый лазер с одной стороны и фотодиод – с другой. Волоконная оптическая линия связи (ВОЛС) – готова! Ее можно, как и кабель, уложить под землей, можно подвесить на столбах, протащить в слуховое окно – словом, обращаться так же, как мы обращаемся с электрическими проводами. Причем ВОЛС имеет явные преимущества. Она не боится сырости (никаких коротких замыканий или утечек тока не будет), не требует изоляции, не коррозирует и не окисляется. А на ее изготовление идет самый недефицитный материал – ведь стекло получают переплавкой обычного песка!

Разумеется, есть и проблемы. О ВОЛС долго спорили. Скорость передачи информации высокая, это хорошо, но вот дальность... Стекло хотя и слабо, но поглощает свет. Первые ВОЛС имели длину десятки метров. Наконец разработали особо прозрачные стекла и подобрали оптимальную длину волны, на которой потери минимальны. Она оказалась в ближней ИК области около 1 ... 1,5 мкм. И вот первый большой успех – в Великобритании сдана в эксплуатацию ВОЛС длиной около 64 км без единого промежуточного усилителя.

Первая в нашей стране подземная телевизионная линия оптического кабеля была подведена в июне 1984 года в Москве к дому 19 (корп. 1) по Алтайской улице. Этот дом находится в так называемой теневой зоне, где телевизионный сигнал сильно ослабляется и искажается из-за интерференции волн, отраженных от окружающих зданий. Приемная антенна была установлена на крыше соседнего 16-этажного здания, откуда видна телебашня в Останкине. Принятым телевизионным сигналом модулировалось световое излучение, направлявшееся в оптический кабель длиной 2,5 км. На другом конце кабеля был установлен фотодетектор, с выхода которого телевизионный сигнал поступал к усилителю и далее в коаксиальную кабельную сеть дома. Что ж, поживем – увидим, что будет дальше, а пока настала пора рассказать о последнем достижении оптоэлектроники – интегральной оптике.

Интегральная оптика

Почему интегральная и что это значит? Ведь оптика как отрасль науки и техники занимается линзами, зеркалами, призмами и тому подобными хорошо знакомыми нам предметами. Путь к интегральной оптике был недолгим и вполне логичным. Как только научились изготавливать миниатюрные источники некогерентного и когерентного света (светодиоды и полупроводниковые лазеры), как только научились делать крохотные полупроводниковые фотоприемники, явилась мысль объединить их с другими, оптическими деталями – модуляторами, световодами (оптическими волноводами), линзами и тому подобными устройствами, с одной стороны, и электронными схемами – с другой. Объединение – значит интеграция, отсюда и произошло название. Возможно и другое толкование. Интегральная микросхема отличается тем, что все ее элементы изготавливаются на одном кристалле в едином технологическом

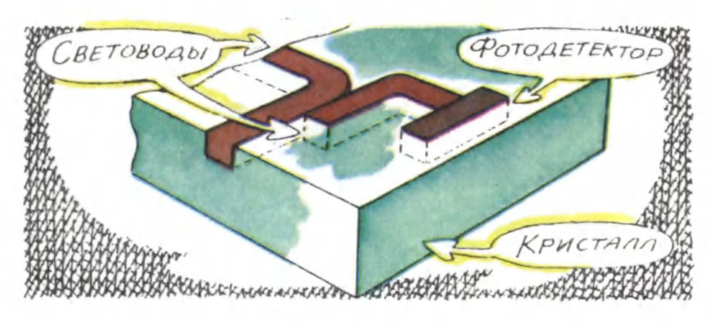
процессе. То же самое относится и к элементам интегральных оптических и оптоэлектронных систем.

Простейший представитель интегральной оптоэлектроники – оптрон выполнен на одной пластинке кремния. В середине ее проходит световод – тонкий канал с отражающими свет стенками. А по краям канала расположены светодиод и фотодиод. Ширина световода может быть малой: до половины длины световой волны. Его свойства во многом подобны свойствам волновода, используемого в технике СВЧ.

Мы привыкли к тому, что свет распространяется прямолинейно. Но это совершенно не относится к световоду. Его можно изгибать, разветвлять, отбирать из него часть энергии. С помощью световодов можно смешивать два оптических сигнала. В принципе весь арсенал средств и изделий СВЧ волноводной техники можно перенести в оптический диапазон. Можно сделать, например, оптический приемник гетеродинного типа миниатюрных размеров.

Обычные фотоприемники: фотоэлементы, фотоумножители, фотодиоды и фототранзисторы – реагируют на очень широкий диапазон частот оптического излучения. Это хорошо, если необходимо регистрировать дневной свет или свет, излучаемый лампой накаливания – светодиодом. Но когда нужно принять сигнал лазера – передатчика с высокой монохроматичностью излучения, широкий диапазон фотоприемника совсем не нужен и даже вреден: будет мешать посторонняя засветка фотоприемника, скажем дневным светом. В светодальномере, например, для ослабления помех от дневного света перед фотоприемником устанавливают узкополосные интерференционные светофильтры – оптические стекла с нанесенными на них тонкими пленками. Фильтр пропускает преимущественно свет с длиной волны используемого лазера и задерживает свет с другими длинами волн. Фотоприемник тем не менее остается обычным «детекторным» приемником и реагирует на все сигналы, пропущенные к нему фильтром.

Оптический гетеродинный приемник отличается принципиально. В нем на нелинейный элемент – фотоприемник, фотодиод – подаются два сигнала: принимаемый и сигнал лазерного гетеродина. Частота гетеродина выбирается несколько отличной от частоты принимаемого сигнала, и в фотодиоде выделяется сигнал биений, который и поступает в усилитель. Полоса частот сигналов, на которые реагирует оптический гетеродинный приемник, намного у́же полосы частот обычного приемника с любыми оптическими фильтрами на входе. Это дает определенные преимущества. Приемник практически полностью перестает реагировать на посторонние сигналы. Дневной свет теперь ему не мешает. Лазерный локатор, например, будет реагиро-



Интегральная схема оптического диапазона

вать только на отражение «своего» сигнала, не страшась никаких помех.

Оптический гетеродинный приемник делали и не используя интегральную оптику. Можно на фотокатод диода или фотоумножителя сфокусировать два сигнала: принимаемый и местного лазера – гетеродина. Но юстировка такой системы очень сложна, ведь фазы оптических сигналов должны быть одинаковыми на всей поверхности фотокатода. В интегральном исполнении подобные приемники получаются и проще и гораздо миниатюрнее. Да и возможностей больше – в световоде можно выгравировать и фильтры, и другие необходимые детали.

Интегральная оптика прекрасно сочетается с микроэлектроникой, и это открывает новые широчайшие возможности. Мы уже говорили о телевизионном экране, составленном из тысяч светодиодов. Управлять светодиодами должна электроника.

Давно уже поговаривают об использовании оптического диапазона в вычислительной технике. Ведь объемы перерабатываемой информации и быстродействие непрерывно растут, а по обоим этим параметрам интегральные оптические системы стоят на одном из первых мест. Вот пример. Чтобы выполнить преобразование Фурье обычным способом, надо взять многие тысячи отсчетов сигнала и произвести миллионы операций умножения, сложения и усреднения. Оптический процессор позволяет выполнять преобразование Фурье практически мгновенно. Информация записывается на оптическом носителе (пленке, жидком кристалле или жгуте оптических волокон) в виде светового изображения, перед которым помещена линза. Фокусируя изображение, линза осуществляет двумерное Фурье-преобразование информации.

Новое чаще всего появляется на стыке наук и технологий, поэтому синтез оптики и электроники в интегральной оптоэлектронике сулит еще немало нового и интересного.

12. КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В этой главе мы не будем обращаться к истории, поскольку космическая эра продолжается всего три десятилетия, а расскажем о том, как радиоэлектроника, которой стало тесно на огромной Земле, завоевывает просторы Солнечной системы. О том, как «электронные глаза» смотрят на другие планеты, как «электронные руки» трогают их поверхность, как «электронный мозг» обрабатывает полученные сведения и «электронная почта» передает их нам, построившим и пославшим чудесных космических разведчиков к другим мирам. Расскажем также о создании космических радиомостов, космическом телевидении и о поиске полезных ископаемых на Земле с помощью космических аппаратов.

Оборудование космических аппаратов

Какое оно? Если попытаться охарактеризовать его одним словом, то это слово наверняка будет: «электронное». Вообще, выход в космос человечеству обеспечили два направления науки и

техники: ракетостроение и радиоэлектроника. Отними первое, и окажется, что нечем вывести космический корабль на орбиту, отними второе, и окажется, что незачем! Любой космический аппарат будет мертв без электроники. Вспомним, что было на первом советском искусственном спутнике Земли (ИСЗ), открывшем космическую эру 4 октября 1957 года. Всего лишь два радиопередатчика на частотах 20 и 40 МГц. Они излучали непрерывно периодические сигналы: «бип...бип...бип». Весь мир слушал, затаив дыхание, эти сигналы. Ну а какова была практическая польза? Оказывается, огромная. Впервые коротковолновый излучатель был поднят на высоту слоя *F* ионосферы. Представилась уникальная возможность экспериментально изучить процессы распространения и преломления радиоволн в ионосфере. На первом спутнике не было систем ориентации, терморегулирования, телеметрии (кстати, все эти системы тоже электронные), тем не менее он жил, посылал радиосигналы и приносил полезную научную информацию.

Неотъемлемую часть радиоэлектронной аппаратуры каждого космического летательного аппарата (КЛА), будь то ИСЗ или исследовательский межпланетный корабль, составляют средства связи, управления, навигации и ориентации. К средствам связи прежде всего относятся телеметрическая и командная радиолинии. Они действуют обычно в дециметровом диапазоне радиоволн, беспрепятственно проходящих сквозь ионосферу Земли. По командной радиолинии с наземных станций управляют работой аппарата. Команды передаются, как правило, цифровым двоичным кодом с использованием фазовой манипуляции. Такой вид связи наиболее помехоустойчив. На КЛА имеется приемник, постоянно настроенный на волну командного передатчика, установленного на Земле. Выходные сигналы приемника передаются в блок управления КЛА.

Телеметрическая информация поступает с КЛА в наземные пункты слежения и позволяет узнавать состояние аппарата: напряжение бортовой сети, температуру внутри корпуса, а также отдельных деталей и механизмов, выявлять неполадки в работе различных систем и т. д. Датчиков в системе телеметрии много, а передатчик один, поэтому телеметрическая информация преобразуется в цифровую и «уплотняется», т. е. объединяется для передачи по одному каналу. Например, первый байт (слово) цифровой передачи несет информацию об одном параметре, второй – о другом, и т. д.

Но нет смысла заставлять работать телеметрический передатчик КЛА постоянно. Это привело бы к большому расходу электроэнергии. Чаще всего телеметрическую информацию записывают на цифровой бортовой магнитофон (запоминающее устройство) и «сбрасывают» на Землю лишь по команде из Центра управления полетом. Этот же магнитофон может накапливать и другую информацию от различных датчиков – магнитометров, счетчиков частиц и микрометеоритов, спектрометров и др. Особо возрастает роль радиоэлектронных устройств при выполнении точных и ответственных операций в космосе, например, таких, как стыковка космических кораблей на орбите. Взаимное расположение кораблей определяют с помощью специальных бортовых радиолокаторов. ЭВМ обрабатывает полученные данные и выдает управляющие сигналы для систем коррекции орбиты.

Если космический корабль обитаемый, то на нем обязательно есть линия телефонной связи с Землей, а на больших обитаемых орбитальных станциях – еще и система космического телевидения. Эти системы оснащаются, как правило, несколькими передатчиками и приемниками, работающими в различных диапазонах волн. Для

связи в любое время с ИСЗ, находящимся на низкой орбите, необходима коротковолновая линия связи. А для высококачественной связи без помех или для передачи телевидения лучше всего подходят сантиметровые и дециметровые волны, но работать эта линия будет только в пределах «радиовидимости» ИСЗ с наземного пункта связи. По этой причине пункты космической связи в нашей стране располагают по всей ее огромной территории. Их даже не хватает, и часто используют корабли с соответствующей аппаратурой, выходящие в Тихий, Атлантический и Индийский океаны.

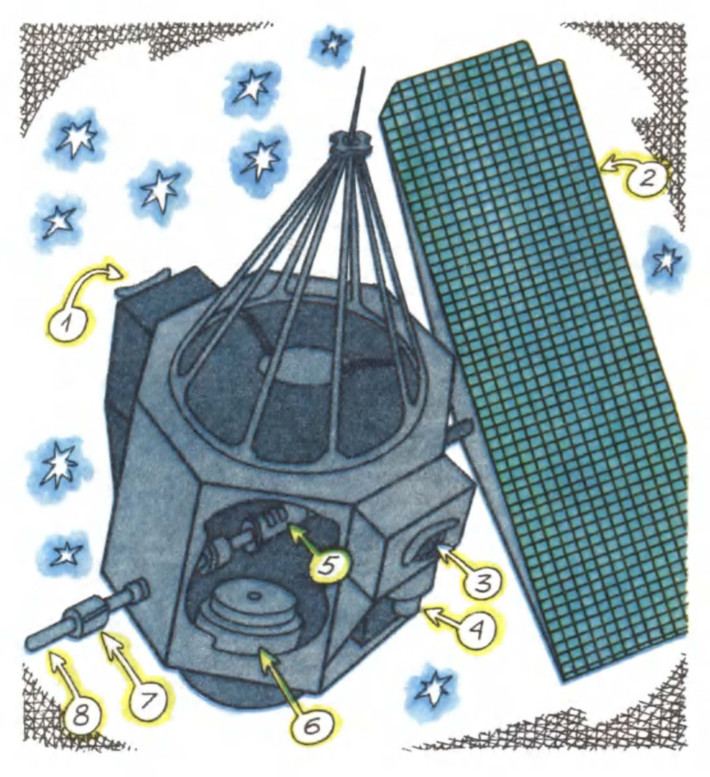
Особые линии связи нужны спутникам, передающим на Землю научную, метеорологическую или народнохозяйственную информацию. Она накапливается бортовым магнитофоном и передается в центр обработки по команде с Земли. Сколь выгодна передача этой информации по радиоканалу, можно понять на простом примере. Если на ИСЗ установить аэрофотокамеру с запасом пленки и снимать поверхность Земли, а затем контейнер с пленкой «отстреливать» и спускать на Землю на парашюте, то каждый снимок



Принцип работы дифференциального датчика Солнца:
1 – светочувствительные платины; 2 – область тени; 3 – экран; 4 – поток солнечных лучей; 5 – Солнце

обойдется очень дорого. Если же передавать такую же информацию по радиоканалу (как в телевидении, с разверткой изображения), то каждый снимок будет значительно дешевле. И чем дольше проработает спутник, тем дешевле станет и передаваемая им информация. Не по «собственной» стоимости, конечно, а по затратам на ее добывание и пересылку.

Ориентация КЛА в пространстве осуществляется по сигналам датчиков направления. Они могут ориентироваться либо на горизонт Земли или планеты, вокруг которой обращается КЛА (датчики горизонта), либо на Солнце, либо на заранее выбранную звезду (датчики астроориентации). Работа датчиков горизонта основана на приеме ИК излучения планеты. Кажущаяся температура космического пространства составляет всего около 4 К (четыре градуса по шкале Кельвина), а температура диска Земли около 260 К. В фокусе ИК оптической системы, направленной на горизонт, установлен ИК



Оборудование системы ориентации метеорологического спутника:
1 – солнечная бленда ИК датчика; 2 – панель с солнечными элементами; 3 – ИК датчик горизонта; 4 – датчик Солнца; 5 – контактные кольца вала солнечных панелей; 6 – инерциальный диск; 7 – солнечный датчик системы ориентации панелей; 8 – вал солнечных панелей

приемник, например терморезистор. Его сопротивление изменяется при попадании в поле зрения края диска планеты, и соответствующий сигнал подается на механизмы поворота КЛА.

Датчик астроориентации также представляет собой типичное оптоэлектронное устройство. Изображение светила проецируется телескопической системой линз на мозаику из нескольких фотоприемников. В зависимости от положения изображения на мозаике вырабатывается сигнал на коррекцию положения КЛА. В других системах используют один фотоприемник, механически сканирующий определенную часть небосвода. Вырабатываемый сигнал ошибки заставляет систему ориентации изменять положение КЛА так, чтобы изображение светила попадало в центр поля сканирования.

Все задачи управления полетом решаются системой управления КЛА. Здесь и ориентация, и стабилизация осей КЛА в пространстве, и наведение, и маневрирование при встрече с другим космическим кораблем или объектом, и включение систем и механизмов по заданной программе, и многое-многое другое. Управляющее устройство должно сравнивать сигналы датчиков, характеризующие те или иные параметры полета, с эталонными, опорными сигналами и выдавать команды на необходимую коррекцию. С этой задачей лучше всего может справиться бортовая ЭВМ, выполненная на основе микропроцессора. Теперь она есть на каждом КЛА.

Автоматические межпланетные станции

Наиболее сложным и многообразным радиоэлектронным оборудованием оснащены автоматические межпланетные станции (АМС), совершающие далекие «прогулки» в пределах нашей Солнечной системы. Автоматические межпланетные станции, как правило, уже не возвращаются на Землю, поэтому вся обширнейшая информация, которую они собирают в продолжение многомесячного полета, передается только по радио.

Научная аппаратура АМС рассчитана на исследование определенной планеты или нескольких планет, а также межпланетного пространства, проходимого АМС на пути к цели. Детальное исследование планеты осуществляют АМС с мягкой посадкой, продолжающие функционировать некоторое время еще и на поверхности планеты. В связи с большими трудностями осуществления мягкой посадки на далекую планету по командам с Земли большинство операций по сближению и посадке осуществляется в автоматическом режиме на основании сигналов многих датчиков и результатов работы большого количества сложной бортовой радиотехнической аппаратуры навигации и наведения.

Вот, например, автоматическая лунная станция (АЛС), в задачи которой входило определение физических условий на поверхности Луны, измерение параметров и свойств лунного грунта, его химического состава на различной глубине, обзор и передача на Землю изображения лунной поверхности в районе посадки.

Работой АЛС управляют две системы: командная, принимающая «указания» с Земли, и программная, руководствующаяся заранее заложенной в памяти программой. Такое «дублирование руководства» позволяет избежать ошибок, связанных с потерей связи и с изменением внешних условий в случае несоответствия запрограммированным ситуациям.

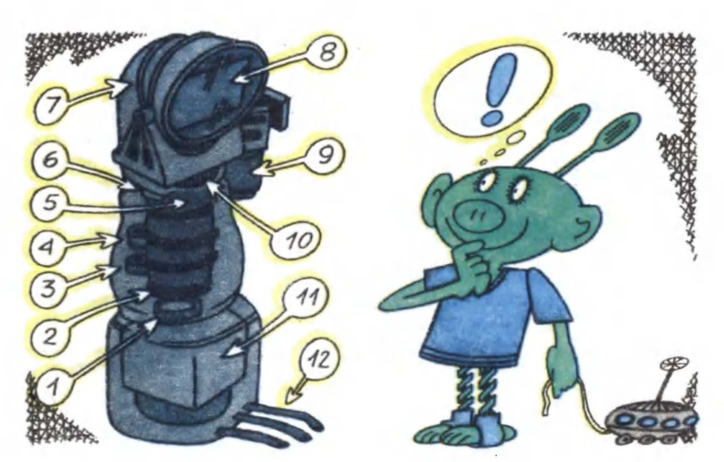
В состав АЛС входит до четырех телевизионных установок. Три из них передают на Землю изображения лунной поверхности вокруг

11–647

АЛС, охватывая все 360° по азимуту и 65° по углу места. В то же время две установки могут быть повернуты в одну сторону для обзора одного и того же сектора. Это позволяет получать стереоскопическое изображение участка местности, по которому с помощью специальной обработки снимков на Земле приборами – стереокомпараторами – можно узнавать размеры наблюдаемых предметов и их удаленность от АЛС. Четвертая телевизионная установка контролирует работу манипулятора станции – механической «руки», отбирающей пробы грунта и предметы на лунной поверхности.

На рисунке показано устройство одной из телевизионных камер. Собственно камера «смотрит» вертикально вверх, а выбор сцены производится поворотным зеркалом. Развертка изображения осуществляется на 200 (малая четкость) или 600 (высокая четкость) строк. Сигналы изображения с малой четкостью передаются на Землю всенаправленной антенной в относительно узкой полосе частот. Такой режим работы нужен при проверке функционирования аппаратуры сразу после посадки, а также в случае выхода из строя остронаправленной антенны или системы ее ориентации в сторону Земли. Сигналы изображения с высокой четкостью передаются остронаправленной антенной в широкой полосе частот. Когда объектив камеры сфокусирован на предметы, находящиеся на расстоянии 4 м, разрешающая способность системы в зависимости от изменяемого фокусного расстояния объектива может составить от 4 до 0,2 мм!

2 января 1959 года была запущена первая советская АЛС «Луна-1», которая впервые в истории достигла второй космической скорости и навсегда покинула поле земного тяготения. В окололунном пространстве она выполнила обширную программу научных исследований и по радио сообщила результаты на Землю. Менее чем



Обзорное телевизионное устройство АЛС:
1 – видикон; 2 – затвор; 3 – потенциометр диафрагмы; 4 – потенциометр фокусного расстояния; 5 – объектив с переменным фокусным расстоянием; 6 – мотор установки зеркала по азимуту; 7 – козырек; 8 – зеркало; 9 – мотор установки зеркала по углу места; 10 – турель со сменными фильтрами; 11 – радиоэлектронные устройства; 12 – кабели

через год, в сентябре 1959 года, АЛС «Луна-2» впервые в мире достигла поверхности Луны, доставив туда вымпел с Гербом Советского Союза. Вслед за этим, в октябре того же года, АЛС «Луна-3» облетела Луну, сфотографировала обратную, невидимую с Земли сторону Луны и изображение передала по радио на Землю. Так человечество впервые получило возможность увидеть обратную сторону Луны.

18 июня 1965 года был осуществлен запуск многоступенчатой ракеты с автоматической станцией «Зонд-3». Она сфотографировала ту часть невидимой с Земли стороны Луны, которая осталась неохваченной при съемке 1959 года. Полученные снимки передавались на Землю не сразу, а спустя почти девять суток после съемки, когда расстояние до станции составляло около 2,2 млн. км. При этом отрабатывалась система передачи изображений на большие расстояния. Передача осуществлялась с малой скоростью, причем каждый кадр для большей достоверности передавался многократно. Передача одного кадра занимала 34 мин при числе строк разложения 1100. Каждая строка содержала 860 элементов изображения; таким образом, общее число элементов в кадре составляло около миллиона. Малая скорость передачи позволила резко сузить полосу частот радиоканала и тем самым увеличить отношение сигнал-шум на выходе наземного приемного устройства, что и обеспечило высокое качество изображения.

Первую мягкую посадку на поверхность Луны осуществила АЛС «Луна-9», запущенная 31 января 1966 года. Радиоэлектронные системы станции обеспечили прием команд и передачу телеметрической информации, измерение параметров движения ракеты-носителя, разгонного блока и самой станции на всех этапах полета, включающих вывод на орбиту ИСЗ, разгон в сторону Луны и торможение перед посадкой в заранее намеченной равнинной части Океана Бурь. На расстоянии 75 км от поверхности Луны по команде бортового радиовысотомера была включена тормозная двигательная ракетная установка. Автоматическая лунная станция с ювелирной точностью опустилась на поверхность, и через 250 с после посадки раскрылись антенны для передачи на Землю научной информации. Радиопередачи велись на частоте 183,538 МГц. Через некоторое время заработали телевизионные камеры и началась передача изображений поверхности в районе посадки.

Образцы лунного грунта доставила на Землю АЛС «Луна-16», а следующая АЛС, «Луна-17», отправила в путешествие по поверхности Луны первый в истории самодвижущийся исследовательский аппарат «Луноход-1». Произошло это 17 ноября 1970 года. Аппарат представлял собой восьмиколесную тележку с установленным на ней контейнером, содержащим научную аппаратуру, телекамеры, антенны, двигатели, энергетическую установку и прочее оборудование. «Луноход-1» управлялся радиокомандами с Земли. Он передавал на наземный пункт управления телевизионные изображения поверхности, по которой двигался. Операторы, сидя в удобных креслах за пультом управления, порой забывали, что управляемый ими объект находится на громадном расстоянии в 380 тыс. км – настолько чутко он реагировал на команды. К радиоэлектронной аппаратуре «Лунохода» предъявлялись особые требования: возможно меньшие масса и габаритные размеры, малое энергопотребление, стабильность параметров в широком диапазоне температур, при воздействии вибрации и ускорений, а также высокая надежность. Надежность и ресурс аппаратуры оказались настолько высокими, что «Луноход» проработал значительно дольше предполагаемого срока.

Автоматические межпланетные станции посылаются не только к Луне, но и к другим планетам Солнечной системы. Первый межпланетный полет АМС «Венера-1» происходил в то же самое время, когда в космос поднялся первый космонавт планеты Ю. А. Гагарин. Дата его полета, 12 апреля 1961 года, теперь отмечается как День космонавтики. Осенью следующего года отправилась в полет АМС «Марс-1». Эти АМС на входили в атмосферу планет. Облетая планету по вытянутой траектории, они передавали на Землю телевизионные изображения и показания приборов (магнитометров, детекторов, микрометеоритов, счетчиков частиц и т. д.). Так было положено начало комплексному исследованию планет Солнечной системы аппаратами, посланными людьми.

Трудности организации радиомоста АМС – Центр управления полетом огромны. Только задержка радиосигнала на пути к Марсу достигает 10 мин. Попробуйте, зная скорость распространения радиоволн ($3 \cdot 10^8$ м/с), оценить длину радиотрассы!

Но расстояния в сотни миллионов километров – не препятствие для современной техники радиосвязи... да и не только радиосвязи. Прежде чем послать, например, к Венере АМС, необходимо очень точно определить параметры орбиты планеты и расстояние до нее. Эти вопросы были решены при радиолокации Венеры наземным радиолокатором, созданным Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом других организаций. Работы проводились под руководством вице-президента АН СССР В. А. Котельникова (его именем названа уже известная читателю теорема). Планетный радиолокатор был размещен в Крыму, на базе Центра дальней космической связи, где имелась эффективная антенная система. Она была выполнена из восьми связанных в общую конструкцию параболических зеркал. Но даже при такой большой площади антенны отраженный от Венеры сигнал оказывается чрезвычайно слабым: его уровень значительно ниже уровня собственных шумов приемника. Для выделения сигнала использовалась достаточно сложная обработка смеси сигнала и шума на ЭВМ.

В последующие годы для целей дальней космической связи, радиолокации планет и радиоастрономических исследований были построены еще более мощные антенные сооружения. Впечатляет, например, полноповоротная параболическая антенна диаметром 75 м, установленная в Подмосковье. Планетный радиолокатор позволил измерить расстояние до Венеры (около ста миллионов километров) с точностью в несколько сотен метров! Это позволило в 10 000 раз уменьшить ошибку в определении астрономической единицы – среднего расстояния от Земли до Солнца. Без такого уточнения был бы невозможным вывод АМС на околовенерианскую орбиту и доставка спускаемых аппаратов в заданный район поверхности планеты.

Первую мягкую посадку на поверхность другой планеты осуществила АМС «Венера-7» в 1970 году. Вслед за ней на поверхность Венеры опустились станции «Венера-9» и «Венера-10». Переданные ими сведения поразили многих. Ранее ученые полагали, что условия на поверхности планеты должны быть близки к земным, но все оказалось не так. Громадное давление атмосферы и высокая температура поверхности сделали Венеру планетой малоподходящей для обитания живых организмов. Каменистая пустыня и затянутое ядовитыми облаками раскаленное венерианское небо – поистине такие условия могут выдержать только автоматы.

Исследования Венеры продолжаются. С помощью АМС «Венера-15» и «Венера-16» в 1984 году проводилась радиолокационная

съемка поверхности планеты. Автоматические межпланетные станции длительное время летали вокруг Венеры как ее спутники и при прохождении наиболее приближенных к поверхности участков траектории (высота около 1000 км) снимали радиолокационное изображение полосы местности длиной до 8000 и шириной 150 км. Один сеанс съемки продолжался 15 мин. На АМС использовались специальные радиолокаторы, созданные в Московском энергетическом институте под руководством академика АН СССР А. Ф. Богомолова. Изображения отдельных отснятых участков поверхности объединялись в общую радиолокационную карту поверхности Венеры. Полученные результаты интересны для нас не только с теоретической, но и с практической точки зрения. Знание эволюции Венеры помогает понять и историю развития Земли, облегчает поиск на Земле полезных ископаемых.

В прозрачной и очень разреженной холодной атмосфере Марса живым организмам, так же как и на Венере, существовать было бы очень трудно. Их там и не обнаружили, даже бактерий. Получается, что жизнь в Солнечной системе – явление уникальное, возникшее только на Земле, и тем с большей бережностью надо к ней относиться. Первая мягкая посадка на Марс осуществлена во время группового полета АМС «Марс-2» и «Марс-3» в 1971 году. Станции передали на Землю изображения планеты и некоторые сведения о ее поверхности.

Космические эксперименты продолжаются. Осуществлены полеты к дальним планетам Солнечной системы – Юпитеру и Сатурну. Автоматические межпланетные станции передали по радиоканалу изображения этих планет, полученные с близкого расстояния. А когда знаменитая комета Галлея приближалась к перигелию и под действием солнечного излучения распустила огромный газовый «хвост», навстречу ей отправились АМС, обогатившие науку новыми сведениями о структуре и происхождении комет. Предполагают, что кометы являются одними из самых старых обитателей Солнечной системы, они сформировались из первоначального газопылевого облака одновременно с планетами, и поэтому изучение комет проливает свет на тайны происхождения Солнечной системы. Без радиоэлектроники подобные исследования космоса были бы просто невозможны.

Электроника и космонавтика

Планомерное и широкое освоение космоса невозможно лишь одними автоматами – полеты людей в космос стали обыденным явлением. В Советском Союзе разработана длительно действующая орбитальная космическая станция «Салют», на которой может находиться постоянный или сменяемый экипаж из нескольких человек. В комплекс орбитальной станции входит собственно орбитальный блок, выводимый в околоземное пространство мощной ракетой-носителем, и транспортный корабль «Союз», на котором отправляются космонавты. Корабль стыкуется на орбите с орбитальным блоком. Кроме того, к станции могут пристыковываться транспортные грузовые корабли типа «Прогресс».

Вся станция представляет собой весьма внушительное сооружение: общая масса орбитального блока и корабля «Союз» составляет около 26 т, длина достигает 23 м, а поперечный размер по раскрытым солнечным батареям 11 м. Внутри станции оборудованы рабо-

чие и спальные места для космонавтов, системы обеспечения их жизнедеятельности. Для проведения научных экспериментов, фотографирования и визуального наблюдения в отсеках станции предусмотрено 27 иллюминаторов.

Полеты космических кораблей и орбитальных станций были бы невозможны без обширного комплекса радиотехнических средств навигации и связи. Во время полета необходимо производить точные траекторные измерения для определения местонахождения корабля. Параметры орбиты измеряются с помощью двух бортовых приемопередатчиков-ответчиков, работающих в различных диапазонах волн. Они ретранслируют радиосигналы, передаваемые с наземных пунктов слежения и связи, и благодаря этому позволяют определять наклонную дальность, радиальную скорость и угловое положение станции относительно наземных пунктов, где и производятся измерения. Полученные данные передаются в координационно-вычислительный центр, обрабатывающий поступающую информацию и определяющий параметр орбиты. Наклонная дальность вычисляется по задержке ретранслированного радиосигнала. Радиальная скорость измеряется по доплеровским изменениям несущих частот передатчиков станции и наземных пунктов. Для определения углового положения станции служат специальные угломерные устройства, входящие в антенные и приемные системы наземных пунктов слежения.

Очень важна роль командных радиолиний между станцией и наземными пунктами. Наземный комплекс посылает на борт команды в виде двоичных чисел (так называемые уставки). Бортовая аппаратура принимает и дешифрирует команды. Информация о



Внимание, стыковка!

работе бортовых систем передается на Землю двумя радиотелеметрическими линиями. Когда станция находится вне зоны радиовидимости наземных пунктов, телеметрическая информация, интересующая Землю, собирается и хранится бортовым запоминающим устройством. В дальнейшем эта информация «сбрасывается» при пролете станции над пунктом слежения.

Во время сеансов связи с космонавтами по КВ каналам передается также и оперативная телеметрическая информация об их состоянии. Вообще же система связи с космонавтами обеспечивает непрерывную двустороннюю телефонную связь на всем протяжении полета. В зоне радиовидимости наземных пунктов используется УКВ диапазон, позволяющий добиться устойчивой связи при прямой видимости между антеннами станции и наземного пункта, а на остальных участках траектории используется КВ диапазон. Связь при этом возможна благодаря преломлению радиоволн в ионосфере Земли.

Орбитальная станция «Салют» оснащена телевизионной системой, имеющей четыре передающие камеры. Две из них установлены внутри станции и позволяют операторам Центра управления полетом наблюдать за работой космонавтов. Две другие камеры расположены снаружи станции. Они нужны для контроля ориентации станции при орбитальном полете. На участке выведения на орбиту одна из внешних телекамер контролировала процесс отделения станции от последней ступени ракеты-носителя. Внешние камеры позволяют наблюдать за работой космонавтов при выходе в открытый космос и за стыковкой кораблей на орбите.

Все телекамеры оборудованы передающими трубками типа «видикон» и развертывают изображение в соответствии с отечественным стандартом на 625 строк при 25 кадрах в секунду. Телевизионная информация поступает на видеоконтрольное устройство, расположенное на пульте управления станции, и на передатчики линии связи с наземными пунктами.

Многочисленная радиоэлектронная аппаратура станции потребляет немалую мощность. Ее поставляют панели солнечных элементов, подобно крыльям развернутые по бокам станции. Их общая площадь составляет несколько квадратных метров. Ток, вырабатываемый солнечными элементами, заряжает буферную никель-кадмиевую аккумуляторную батарею, обеспечивающую питание аппаратуры станции при пиковых нагрузках, а также при полете станции над теневой, ночной стороной Земли. Продолжительность нахождения станции в тени Земли достигает 40% общего полетного времени.

По-иному решили проблему питания радиоэлектронной аппаратуры космических кораблей американские конструкторы. При осуществлении программы «Аполлон», завершившейся 16–24 июля 1969 года первой лунной экспедицией трех космонавтов, были разработаны специальные электрохимические источники тока – топливные батареи. Вещество элементов этих батарей в процессе выработки электроэнергии не расходуется. Оно служит лишь катализатором реакции соединения водорода с кислородом. Эти газовые реагенты - топливо батарей - заправляются в баки при запуске корабля и расходуются в топливных элементах по мере надобности. Побочным продуктом электрохимической реакции оказывается обычная вода, использовавшаяся для питья и других хозяйственных нужд космонавтов. Ежедневно каждому космонавту требуется около ведра воды, и для многодневного полета запас ее получается значительным. Топливные элементы избавляют от необходимости «везти» воду с Земли. К сожалению, вода, полученная из экологичес-

ки чистых топливных элементов, оказалась не совсем «чистой». Она напоминала газированную, поскольку была насыщена водородом, что, по сообщениям космонавтов, было не очень приятно (обычная газированная вода насыщается углекислым газом). В дальнейшем научились с помощью специальных фильтров очищать воду, полученную из топливных элементов.

Кроме топливных элементов на кораблях «Аполлон-11» и «Аполлон-12», осуществлявших полет к Луне, имелись резервные батареи обычных аккумуляторов. Они, кстати говоря, позволили благополучно вернуться на Землю экипажу аварийного корабля «Аполлон-13», на котором взорвался кислородный бак системы электроснабжения. Общее энергопотребление космических кораблей и орбитальных станций достигает нескольких киловатт, и эту весьма значительную мощность обеспечивают описанные энергетические установки.

Мирное освоение космоса человечеством продолжается, и одной из наиболее ярких страниц международного сотрудничества явилась стыковка на орбите в июле 1975 года советского и американского космических кораблей «Союз» и «Аполлон». Совершая совместный полет, космонавты в буквальном смысле ходили друг к другу в гости!

Но космическая электроника служит не только космонавтам – она немало помогает и в разрешении наших земных насущных проблем.

Спутники связи

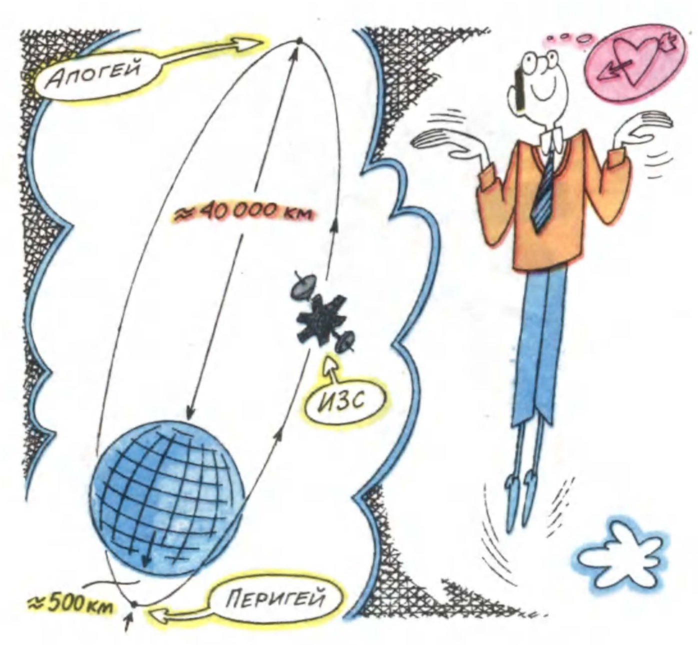
Когда вы смотрите телевизионные передачи о достижениях космической техники или работе и жизни отважных космонавтов на пилотируемой орбитальной станции, то, вероятно, не задумываетесь, каким путем приходит телевизионный сигнал к вашему приемнику. Этот путь часто включает и космический участок через спутник-ретранслятор. В удаленные районы Сибири и Дальнего Востока программы телевидения передаются только по космическому телевизионному мосту. Каковы же причины, приведшие к созданию космических телевизионных трасс? Одна из причин нам уже известна из главы о распространении радиоволн. Телевизионный сигнал занимает широкий спектр частот, и передавать его можно лишь в диапазоне УКВ. А ультракороткие волны распространяются по прямой, в пределах видимости между башней телецентра и приемной антенной вашего телевизора.

Примерно до 1967 года важная государственная задача охвата телевизионным вещанием всего населения страны решалась путем строительства мощных радиопередающих телевизионных центров (5...50 кВт) и ретрансляторов малой мощности (1...100 Вт). Пока эти станции строились в густонаселенных районах страны, ввод каждой из них означал значительный прирост числа телезрителей. На 1 января 1961 года в стране было построено 100 мощных телевизионных передатчиков и около 170 маломощных ретрансляторов, обеспечивавших телевизионным вещанием примерно 35% населения. В последующие пять лет число мощных станций и ретрансляторов возросло соответственно до 170 и 480, а прирост числа телезрителей составил лишь 20%. Стало ясно, что дальнейшее увеличение числа передающих телевизионных станций экономически нецелесообразно. Расчеты показали, что для охвата телевизионным вещанием 95% населения страны потребовалось бы более 1000

мощных телецентров, многие тысячи километров кабельных и радиорелейных линий для обмена программами, что связано с огромными капитальными затратами.

Единственным реальным средством решения задачи стопроцентного охвата населения страны телевизионным вещанием в сжатые сроки оказалось использование спутниковых систем. 23 апреля 1965 года в Советском Союзе был произведен запуск спутника связи «Молния-1» на высокую эллиптическую орбиту с апогеем в северном полушарии и перигеем – в южном. Начальный период обращения спутника был близок к половине суток и составил 11 ч 48 мин. Такой период обращения выбран не случайно: спутник должен появляться над обслуживаемой территорией всегда в одно и то же время, скажем в часы вечерних телепередач. На борту спутника была установлена ретрансляционная аппаратура для передачи программ телевидения и дальней двусторонней многоканальной телефонной, фототелеграфной и телеграфной радиосвязи. Первый прямой телевизионный обмен телевизионными программами между Москвой и Владивостоком состоялся!

На выборе орбиты спутника следут остановиться особо. Орбита представляет собой сильно вытянутый эллипс, в одном из фокусов которого находится центр Земли. Плоскость орбиты наклонена к плоскости экватора под углом около 65°, причем апогей орбиты – наиболее удаленная от Земли точка – находится в северном полушарии. Высота апогея составляет около 40 000 км, а высота перигея – всего около 500 км. В соответствии с законами Кеплера, которым подчиняются все движущиеся небесные тела, спутник пролетает

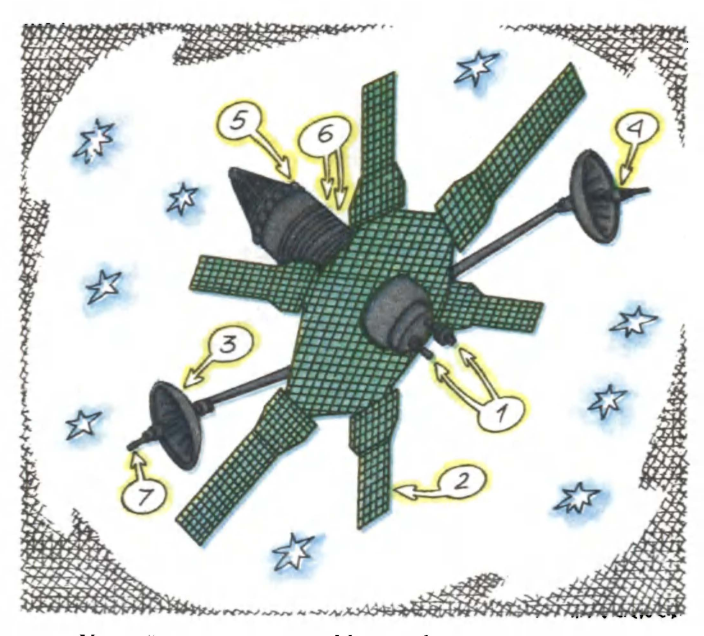


Орбита ИСЗ «Молния-1»

приближенную к Земле часть орбиты, включающую точку перигея, очень быстро. Ретранслятор спутника на этом отрезке орбиты, расположенном в южном полушарии, выключается. Зато удаленную от Земли часть орбиты, включающую точку апогея, спутник проходит медленно, он как бы «зависает» на несколько часов над Сибирью и Дальним Востоком. В это время и ведется ретрансляция телевизионных программ. Поскольку период обращения спутника равен 12 ч, в течение суток он совершает два витка вокруг Земли. На первом витке в течение девяти часов обеспечивается связь между любыми пунктами как на территории СССР, так и других стран Европы и Азии. Во время второго витка в течение трех часов возможна связь между европейской частью СССР и Центральной и Северной Америкой.

Корпус спутника связи «Молния-1» выполнен в виде цилиндра, на котором расположены шесть панелей с солнечными батареями и две направленные параболические антенны. Эти внешние устройства раскрываются после вывода спутника на орбиту. В торцах цилиндра расположены датчики ориентации и двигательная установка для коррекции орбиты. На внешней поверхности корпуса расположены также радиаторы системы терморегулирования. Работой спутника управляет программно-вычислительное устройство на основе сигналов командно-измерительной аппаратуры.

Основную полезную нагрузку спутника составляет ретранслятор. Принятые с Земли сигналы через приемную антенну поступают

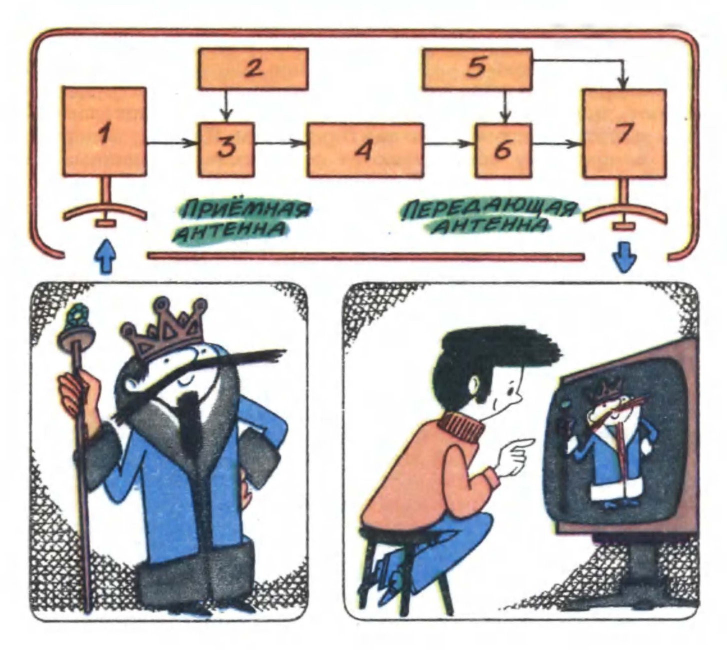


Устройство спутника «Молния-1»:
1 – датчики ориентации; 2 – солнечные батареи; 3, 4 – направленные антенны; 5 – корректирующая двигательная установка; 6 – радиатор-охладитель; 7 – датчик ориентации антенн на Землю

на входное устройство и далее – на преобразователь частоты. Основное усиление сигналов происходит на сравнительно низкой промежуточной частоте. Затем сигнал еще раз преобразуется по частоте и усиливается оконечным усилителем мощности, выполненным на лампе бегущей волны. Усиленный сигнал излучается передающей антенной в сторону Земли. Выходная мощность ретранслятора достигает 40 Вт. Столь большая мощность бортового передатчика позволила упростить оборудование наземных станций и повысить помехоустойчивость связи. Для повышения надежности на спутнике связи «Молния-1» установлено три ретранслятора – один рабочий и два резервных.

При разработке описанного ретранслятора, работающего в диапазоне частот около 1 ГГц, пришлось решить немало технических проблем. На столь высоких частотах дециметрового диапазона обычные лампы и транзисторы уже не могли обеспечить большой выходной мощности. А пригодные для этой цели лампы бегущей волны имели большие габаритные размеры и массу. Было предложено оригинальное решение – отказаться от баллона лампы! Ведь космический вакуум более глубок, чем вакуум, создаваемый в земных условиях в баллонах радиоламп. В результате масса и габаритные размеры усилителя мощности значительно снизились.

В 1967 году, к 50-летию Великого Октября, вступила в регулярную эксплуатацию спутниковая телевизионная сеть, работающая со



Структурная схема ретранслятора связного спутника: 1 – приемник; 2 – первый гетеродин; 3 – первый преобразователь частоты; 4 – усилитель промежуточной частоты; 5 – второй гетеродин; 6 – второй преобразователь частоты; 7 – усилитель мощности на лампе бегущей волны

спутниками типа «Молния» и насчитывающая 20 наземных станций «Орбита». К 1983 году число их приблизилось к сотне. Приемная станция «Орбита» представляет собой комплекс сооружений, состоящий из большой поворотной параболической антенны диаметром 12 м, установленной на круглом железобетонном здании, и приемного устройства, размещенного внутри здания. Зеркало антенны изготовлено из специального алюминиевого сплава, масса зеркала составляет 5,5 т, а вместе с опорно-поворотным устройством — около 50 т. Для уменьшения уровня внутренних шумов, а следовательно, и повышения чувствительности приемного устройства на его входе установлен малошумящий параметрический усилитель, охлаждаемый жидким азотом. Полученная на станции телевизионная программа передается далее на местный телецентр или ретрансляционную станцию и излучается в эфир в стандартных телевизионных каналах.

С 1974 года основная часть станций сети «Орбита» переведена в диапазон 4 ГГц для работы с новыми поколениями спутников «Молния-2» и «Молния-3». Эти же станции могут работать и с геостационарными спутниками типов «Радуга» и «Горизонт». Что такое геостационарный спутник, следует пояснить особо. Его запускают на очень высокую круговую орбиту, расположенную в плоскости экватора Земли. Высота геостационарной орбиты составляет около 36 000 км, при этом период обращения спутника вокруг Земли в точности равен одним суткам, т. е. совпадает с периодом собственного вращения Земли. Вращаясь в ту же сторону, что и вся планета, геостационарный спутник как бы зависает над одной и той же точкой экватора. Антенну наземной станции достаточно навести на геостационарный спутник один раз. Это очень удобно, затруднения возникают лишь в полярных районах, из которых геостационарный спутник «виден» слишком низко над горизонтом. Поэтому полярные районы по-прежнему обслуживаются спутниками, летающими по вытянутым эллиптическим орбитам.

Стоимость сооружения наземной станции «Орбита» довольно высока. Поэтому строительство их экономически оправдано лишь в крупных населенных пунктах с числом жителей не менее пятидесяти тысяч. Когда все такие пункты были оснащены приемными станциями, развитие сети «Орбита» приостановилось и была поставлена задача создания новых, гораздо более дешевых спутниковых систем телевизионного вещания.

Новая система спутникового телевизионного вещания «Экран» создавалась специально для охвата телевидением небольших поселков, сел и деревень, полевых станов и экспедиций, разбросанных по бескрайним просторам Сибири, Крайнего Севера и частично Дальнего Востока. Зона обслуживания системы достигает площади 9 млн. кв. км, что составляет около 40% всей территории страны.

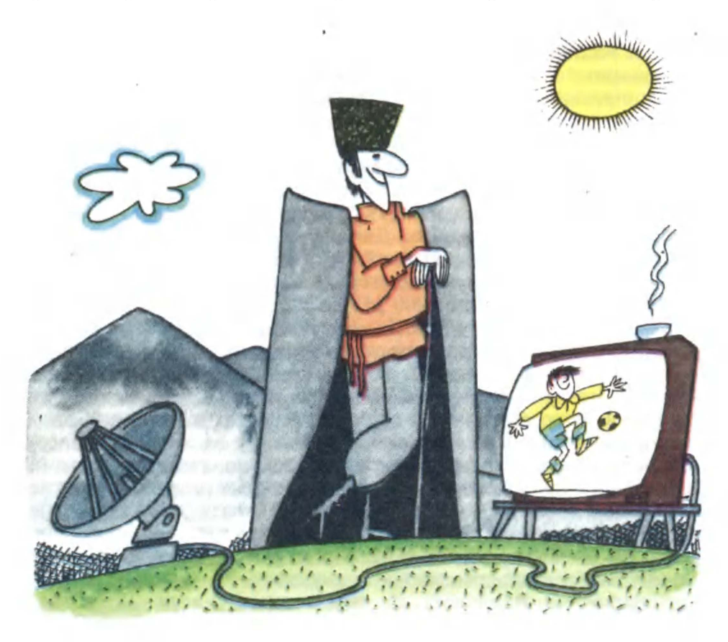
Первый спутник «Экран» был запущен 26 октября 1976 года на геостационарную орбиту. К этому времени уже была развернута опытная сеть из 60 приемных установок. Для системы «Экран» был выбран диапазон частот около 700 МГц, что по расчетам обеспечивало минимум стоимости системы. В приемных установках этого диапазона можно использовать недорогие транзисторные усилители и простые многоэлементные антенны типа «волновой канал». Спутник «Экран» оснащен передатчиком с огромной выходной мощностью: 200 Вт, что позволило получить высокое качество изображения при использовании простых приемных установок. Огромная раскрывающаяся в космосе антенна спутника содержит 96 спиральных излучателей, формирующих требуемую диаграмму направлен-

ности. Высоконаправленная антенна решает и еще одну задачу: уменьшает до допустимого значения уровень сигнала на территории сопредельных государств, использующих диапазон 700 МГц для наземного телевизионного вещания, и таким образом устраняет взаимные помехи.

Энергетическая установка спутника «Экран» включает панели солнечных батарей большой площади, обеспечивающие мощность до 2 кВт. Специальная трехосная система стабилизации и ориентации спутника с высокой точностью удерживает его в заданном положении относительно Земли и обеспечивает ориентацию диаграммы направленности антенны на зону обслуживания.

Для системы «Экран» разработаны приемные установки двух типов. Более сложная установка, предназначенная для сравнительно больших населенных пунктов, комплектуется синфазной антенной системой из 32 антенн типа «волновой канал». Супергетеродинный приемник и устройство демодуляции принятых сигналов выполнены в виде одной стойки (небольшого шкафа) размерами 140 × 70 × 34 см. Вся аппаратура собрана на транзисторах. Демодулированный сигнал подается на местную телевизионную станцию или ретранслятор.

Установки второго типа заметно проще. Они предназначены для подачи телевизионного сигнала на маломощный ретранслятор, в кабельную сеть, подобную сети коллективной телевизионной антенны. В них применяются антенные системы, состоящие всего из четырех антенн типа «волновой канал» (каждая антенна содержит рефлектор, активный вибратор из 30 директоров). Малогабаритный транзисторный приемник переносит спектр сигнала с принятой



Телевидение проникает в отдаленные уголки страны

частоты диапазона 714 ± 12 МГц на частоты одного из стандартных телевизионных каналов, а также преобразует частотную модуляцию сигнала, используемую в спутниковом телевидении, в амплитудную, которая применяется в обычном наземном телевизионном вещании. Как видим, приемное устройство спутникового телевидения получилось достаточно компактным.

Система «Экран» оказалась весьма эффективным средством телефикации Сибири и Крайнего Севера СССР. Но использование ее в других районах страны невозможно, так как привело бы к созданию недопустимо больших помех наземным телевизионным средствам соседних государств. В связи с этим потребовалось создать аналогичную по простоте спутниковую систему подачи программ телевизионного вещания на некоторые области Урала, Средней Азии и Дальнего Востока.

Такая система была разработана и в 1979 году введена в действие. Система «Москва» работает в диапазоне 4 ГГц (длина волны 7,5 см) с геостационарными спутниками серии «Горизонт». Бортовой передатчик мощностью 40 Вт в сочетании с высоконаправленной антенной создает достаточно высокую напряженность поля у поверхности Земли, а благодаря высокой направленности антенны ослабляются помехи на соседних с зоной обслуживания территориях. Для приема телевизионного сигнала со спутника «Горизонт» требуется наземная антенна со сравнительно небольшим диаметром зеркала (всего 2,5 м). На входе приемника устанавливают неохлаждаемый параметрический усилитель, а все остальное приемное оборудование размещают в одной небольшой стойке. Для его размещения не требуется строительства специальных зданий.

Система «Москва» позволяет передавать один канал изображения с высоким качеством и два канала звукового сопровождения. Для охвата всей территории страны в системе используется четыре геостационарных спутника «Горизонт», размещенные в разных точках. Число приемных пунктов системы уже превысило 300 и продолжает быстро увеличиваться. Высвободившиеся станции системы «Орбита» используют для приема второй Общесоюзной телевизионной программы, ретранслируемой спутниками «Молния» и «Горизонт».

Телевизионные сигналы на спутники-ретрансляторы подаются с наземного передающего пункта. Для спутника «Экран», например, наземный пункт, расположенный в Подмосковье, оборудован антенной диаметром 12 м и передатчиком мощностью 5 кВт. Передача на спутник ведется в диапазоне 6200 МГц методом частотной модуляции с девиацией частоты ± 9 МГц. Наземный пункт связан радиорелейной линией с Общесоюзным телевизионным центром в Останкине.

Особый интерес представляет использование спутников для телефонной и телеграфной связи. Установлено, что объем информации, которую нужно передавать оперативно и с высокой достоверностью, возрастает примерно пропорционально квадрату объема промышленного производства. Число телефонных разговоров также катастрофически растет. Линии проводной связи давно уже не вмещают всей массы информации, на КВ ее тоже уже не передашь, остаются УКВ. Радиорелейные линии с ретрансляторами через каждые 30...50 км отчасти решают проблему, но тянуть радиорелейную линию до Владивостока очень дорого, а до Петропавловска-Камчатского – практически невозможно: надо огибать Охотское море по малонаселенным местам с первозданной природой и суровым климатом. Спутник связи ретранслирует передачу только

один раз, и, пожалуйста,– готова линия связи Москва – Петропавловск-Камчатский!

Внутрисоюзная система спутниковой связи обеспечивает магистральную связь между крупными промышленными, административными и культурными центрами, а также передачу центральных программ радиовещания и изображений газетных полос из Москвы в различные города и пункты страны. В системе используют те же спутники, что и для ретрансляции телевизионных программ: «Радуга», «Горизонт» и «Молния». Земная сеть системы связи содержит базовые станции, оснащенные антеннами диаметром 25 м. Они расположены в районе Москвы и Комсомольска-на-Амуре. Через них организован «космический мост» емкостью 240 двусторонних телефонных каналов между западными и восточными районами страны. Телефонные сообщения передаются цифровыми методами с использованием импульсно-кодовой модуляции. Пропускная способность высокочастотного ствола спутникового ретранслятора составляет 40 Мбит/с, что соответствует примерно 600 телефонным каналам. Через один ствол может одновременно работать до 36 наземных станций. Большинство наземных периферийных станций организовано на базе приемных телевизионных станций системы «Орбита».

Некоторые земные станции связи работают через спутники «Горизонт» с использованием аппаратуры «Группа», обеспечивающей передачу в цифровой форме группы из восьми телефонных каналов со скоростью 512 кбит/с. При этом общее число групп, передаваемое в одном стволе, достигает 24, что соответствует пропускной способности ствола около 200 телефонных каналов. Спутник «Горизонт» позволяет работать одновременно в шести стволах.

Велики успехи нашей страны в области создания международных спутниковых систем связи. 15 ноября 1971 года представители девяти социалистических государств: Болгарии, Венгрии, ГДР, Кубы, Монголии, Польши, Румынии, Советского Союза и Чехословакии – подписали соглашение о создании международной организации «Интерспутник». Она предназначена для удовлетворения потребности стран в обмене телевизионными и радиовещательными программами, телефонно-телеграфными сообщениями и другими видами информации с помощью системы космической связи. Впоследствии членами «Интерспутника» стали Социалистическая Республика Вьетнам, Народная Демократическая Республика Йемен и Демократическая Республика Афганистан.

Организация пока не имеет своих спутников. Она арендует на льготных условиях отдельные каналы и стволы спутников связи, принадлежащих Советскому Союзу. Земные же станции принадлежат построившим их странам. Первая за пределами СССР станция была сооружена на Кубе, вторая – в Чехословакии, под Прагой. Теперь такие станции имеют все страны, участвующие в соглашении. В нашей стране сооружен Международный центр спутниковой связи «Дубна», предназначенный для работы в системах «Интерспутник» и «Интелсат» через геостационарные спутники Атлантического региона «Горизонт» и «Интелсат-IV А». Работа в системе «Интелсат» предполагает обмен телевизионными программами со странами Запада. Благодаря спутниковым системам налаживается телевизионный обмен в глобальном масштабе. Просмотр футбольного матча, состоявшегося, например, в Мексике, для москвичей стал обыденным явлением!

Как же видоизменялись и развивались спутники связи в странах

Запада? Первый англо-американский спутник связи, запущенный в конце 50-х годов, «Эхо-1» был крайне прост. После вывода на орбиту крошечного неуправляемого спутника открывался клапан помещенного в нем баллончика со сжатым газом и надувалась пластиковая оболочка, покрытая тонким слоем алюминиевой пудры. Получался шар-отражатель диаметром 30 м. Никаких активных ретрансляторов на спутнике не было. Сигнал с Земли излучался мощными передатчиками с остронаправленными антеннами, и такими же огромными антеннами были оснащены сверхчувствительные приемники, охлаждаемые жидким азотом для уменьшения собственных тепловых шумов.

Спутник «Эхо-1» имел одно неоспоримое достоинство: пропускная способность его была неограниченна, ведь пассивному отражателю безразлично, сколько и каких сигналов от него отражается. Просуществовав на орбите недолгое время, легкая оболочка затормозилась даже в крайне разреженном газе верхней атмосферы и сгорела, войдя в более плотные слои.

С 1965 года страны Запада используют серию связных спутников «Интелсат», размещаемых на геостационарных орбитах над Тихим, Атлантическим и Индийским океанами. Спутники обслуживают систему глобальной связи между любыми двумя точками земной поверхности, за исключением полярных областей. Международный консорциум спутниковой связи «Интелсат», образованный в 1964 году, к 1972 году имел в эксплуатации 72 наземные станции, размещенные в 48 странах. А вот как примерно за те же годы изменялись параметры спутников. Первая цифра относится к спутнику «Интелсат-1», запущенному в 1965 году, а вторая – к спутнику четвертого поколения «Интелсат-4». Пропускная способность возросла с 240 телефонных каналов и одного телевизионного до 9000 телефонных и 12 телевизионных. Энерговооруженность спутника возросла с 46 Вт до полукиловатта, а срок активного существования увеличился с полутора до семи лет.

«Интелсат-4» представляет собой внушительное сооружение цилиндрической формы диаметром около 2,5 и высотой около 3 м. Масса его близка к полутора тоннам, включая заряд твердого топлива для собственного двигателя и 120-килограммовый запас гидразина для работы малых реактивных двигателей ориентации и коррекции орбиты.

Для вывода в космос этого тяжелого спутника нужна мощная ракета-носитель «Атлас-Центавр». Но и она выводит его только на промежуточную эллиптическую орбиту с высотой в перигее 640 км и в апогее 35 900 км. На конечную геостационарную орбиту спутник переходит с помощью собственного двигателя.

Корпус спутника издали напоминает вращающийся зеркальный цилиндр. Вся цилиндрическая поверхность покрыта мозаикой из 45 000 солнечных элементов, каждый площадью около 2 см^2. Может возникнуть вопрос: а почему солнечные элементы не расположены на плоских панелях, которые мы привыкли видеть на снимках многих КЛА? Дело в том, что «Интелсат» стабилизирован на орбите точно так же, как стабилизирован волчок, вертящийся на столе. Спутник вращается вокруг оси цилиндрического корпуса с частотой 1 об/с. Представьте, каково было бы там космонавтам! Но, по счастью, их на спутнике нет, а на работе аппаратуры вращение никак не отражается.

Ретрансляционная радиосистема спутника работает на прием в диапазоне частот 5932...6418 МГц, а на передачу – 3707...4193 МГц. Используемая ширина полосы ретранслируемых частот достигает

432 МГц. Поскольку сразу всю эту полосу передать трудно, система содержит двенадцать 750-канальных ретрансляторов, работающих в смежных частотных диапазонах с шириной полосы 36 МГц. Этой полосы как раз достаточно для передачи одного канала цветного телевидения. При телефонной связи для каждого канала отводится полоса частот 4 кГц. В телефонных каналах можно передавать и цифровую информацию.

Антенное хозяйство спутника «Интелсат» содержит шесть антенн. Тут уж действительно приходится говорить об антенном хозяйстве. Четыре рупорные антенны – две передающие и две приемные – постоянно подключены к своим ретрансляторам. Диаграмма направленности рупорных антенн захватывает всю видимую со спутника поверхность земного шара. Еще две антенны с параболическими зеркалами-рефлекторами имеют более узкую диаграмму направленности с шириной луча около 4,5°. Они могут наводиться на определенный участок земной поверхности радиусом примерно 1600 км. Центры «освещаемых» участков могут находиться в любом месте видимой со спутника поверхности Земли. Таким образом, можно обеспечить ретрансляцию сигналов между двумя странами или двумя регионами одной страны. Разумеется, столь сложный и совершенный связной спутник недешев. Изготовление одного летного образца спутника обошлось в 13,5, а запуск – в 16 млн. долларов. Тем не менее программа «Интелсат» предусматривает запуск восьми ИСЗ. Но надо сказать, что затраты быстро окупаются платой за телефонные переговоры и за аренду телевизионных каналов.

Большие спутники-ретрансляторы с мощными передатчиками, например «Релей», «Синком», «Телстар» и уже упомянутый «Интелсат», позволяют не только передавать огромную информацию на межконтинентальные расстояния, но решают и ряд других задач. Одна из важнейших – обеспечение постоянной и устойчивой связи с малыми подвижными объектами – кораблями, самолетами или даже геологической партией. Для решения этой задачи можно использовать УКВ, но только на малых расстояниях, в пределах прямой видимости. На УКВ работают, например, служба скорой помощи, такси. Но это в городах, где дальность связи не превышает 10...15 км. Как быть, скажем, в тайге или в океане? Раньше выход был один – короткие волны. Но условия прохождения их неустойчивы, помех много, нужны большие мощности и длинные антенны. Тут уж не до портативности. Сейчас передать сигнал на связной спутник можно с помощью карманной радиостанции с короткой штыревой антенной. Не верите? Мне самому трудно было поверить, пока я не послушал сигналы радиолюбительских станций, ретранслируемые через ИСЗ. Приемник был самодельным, размером чуть больше карманного фонарика, а антенной служил отрезок провода длиной 2,5 м.

Теперь свои спутники имеют даже радиолюбители. И аппаратуру для ретрансляции сигналов они изготовили сами в студенческих конструкторских бюро московских институтов и в лабораториях клубов ДОСААФ. Первые два спутника «Радио-1» и «Радио-2» были отправлены «попутным грузом» с очередным исследовательским ИСЗ «Космос-1045» и выведены на орбиту 26 октября 1978 года.

Доступ к ретрансляторам радиолюбительских спутников открыт для всех, кто имеет позывной и личную радиостанцию. Многие зарубежные радиолюбители не замедлили установить радиосвязи через наш спутник, точно так же, как и наши радиолюбители «работали» через американские спутники серии «Оскар». Читатели, которые захотят подробнее познакомиться с радиолюбительскими

ИСЗ, могут прочесть о них в первых номерах журнала «Радио» за 1979 год. Радиолюбительство, это, конечно же, очень интересно, но ИСЗ решают и чрезвычайно важные народнохозяйственные задачи.

Другие профессии космической радиоэлектроники

Казалось бы, парадокс: чтобы найти полезные ископаемые, нужно копать землю; чтобы узнать степень созревания хлебов, надо сорвать колосок, а чтобы узнать погоду, следует выйти на улицу. Почему все эти совершенно земные дела надо делать со спутника? Смысл в этом, оказывается, очень большой. Возьмем в качестве примера погоду. Если сейчас небо затянуто тучами и идет дождь, то через полдня небо может расчиститься и засияет солнце, а может произойти и другое: тучи сгустятся еще сильнее и дождь зарядит на неделю. Как узнать, какая погода нас ожидает? А ведь знание погоды очень важно для правильного планирования сельскохозяйственных работ, строительства, навигации кораблей и самолетов. А сколько здоровья городским жителям сохранит правильный прогноз погоды! Но чтобы он был правильным, надо собрать информацию со многих тысяч метеорологических наблюдательных пунктов, обработать эти данные, составить карту погоды по всей территории страны, континента, полушария и уж только тогда заниматься прогнозом. Построить такую огромную сеть датчиков, непосредственно измеряющих параметры атмосферы, практически невозможно, особенно если учесть, что бóльшая часть воздушного океана расположена над водной поверхностью. А наблюдения в отдельных точках дают пеструю, мозаичную картину с большими отклонениями от истинной погоды.

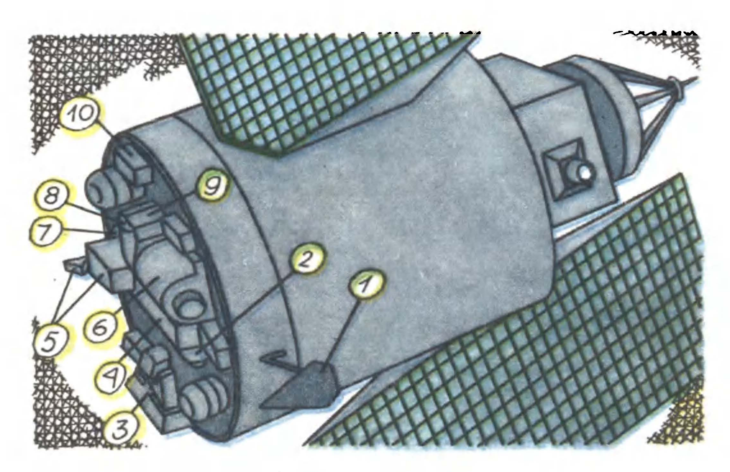
Проблему решают метеорологические спутники серий «Метеор» (СССР), «Нимбус» (США), и др. Взгляд сверху с большой высоты позволяет прежде всего получать совершенно точное распределение облачности по огромным территориям. Облачность очень хорошо отображает атмосферные процессы: фронты, циклоны, воздушные течения. Датчики ИК излучения, установленные на спутнике, дают картину теплового баланса планеты, что позволяет заранее обнаруживать очаги возникновения циклонов, ураганов, конфигурацию морских течений, «отапливающих» побережья. Подсчитано, что годовой выигрыш хозяйства страны только за счет долгосрочных прогнозов погоды для транспорта, контроля водных ресурсов, борьбы с паводками и наводнениями, своевременного получения штормовых предупреждений в четырнадцатикратном размере превышает расходы на создание и эксплуатацию метеорологических спутников.

Мы уже привыкли, слушая сводку погоды, встречать сообщения о том, что сведения получены со спутника «Метеор», и знаем, что сведения эти достоверные. В околоземном пространстве работает несколько метеорологических станций «Метеор-2», относящихся ко второму поколению спутников погоды. С их борта передаются данные о распределении облачности, ледового и снежного покровов на земном шаре, глобальные данные о температурных полях и высотах верхней границы облаков, температуре водной поверхности. Передача ведется по двум радиолиниям. По одной из них, работающей в диапазоне 460...470 МГц, передается поток комплексной метеорологической и радиометрической информации, по другой, в диапазоне 137...138 МГц, ведется непосредственная передача локальных телевизионных изображений. Прием глобальной информа-

ции осуществляется на наземных центрах в Москве, Новосибирске и Хабаровске. Имеется и большая сеть автономных приемных пунктов, которые могут находиться в любом пункте страны и даже на судах в море. На них можно получить телевизионное изображение текущего состояния облачного, ледового и снежного покровов в режиме непосредственной передачи при пролете спутника через зону радиовидимости из данного приемного пункта. Все эти данные, разумеется, могут быть приняты и на зарубежных пунктах приема. Основные же массивы глобальной информации подвергаются обработке в наземных центрах. Обработка предусматривает коррекцию геометрических и других нелинейных искажений снимков, их географическую и временну́ю привязку изображений к районам съемки. Изображения, полученные от точных сканирующих устройств с калибровочными сигналами, фотометрируются, преобразуются в цифровую форму и направляются в память ЭВМ.

После первичной обработки массивы информации объемом в сотни миллионов бит выдаются специалистам различных направлений для целевой или вторичной обработки. Метеорологи извлекают из нее данные для прогнозов погоды, гидрологи – для контроля паводков, наполнения водохранилищ, определения границы таяния снегов, лесники – для контроля за лесными пожарами, и т. д.

Метеорологические спутники непрерывно совершенствуются. Их аппаратура пополняется СВЧ устройствами для всепогодного наблюдения ледового и снежного покровов, определения влагосодержания облачности, обнаружения зон осадков, а также другими полезными приборами. Как же устроены столь полезные помощники

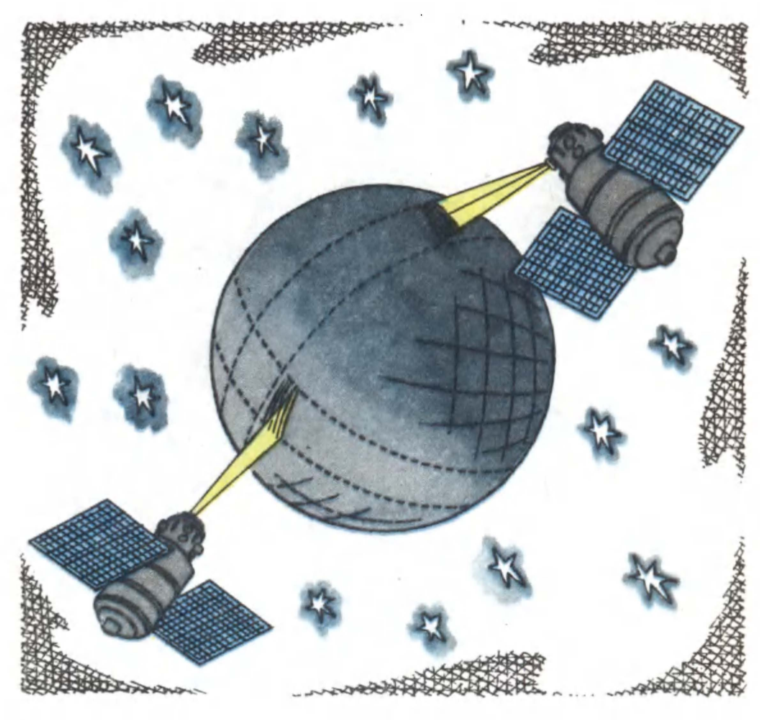


Метеорологический спутник:
1 – *антенна;* 2 – *телевизионная камера;* 3 – *инфракрасный интерференционный спектрометр;* 4 – *радиометр, регистрирующий излучение от верхней части облаков;* 5 – *ультрафиолетовый спектрометр обратного рассеивания;* 6 – *радиометр для измерений над освещенной и теневой сторонами Земли;* 7 – *спектрометр с фильтром и фотометрическим клином;* 8 – *инфракрасный спектрометр;* 9 – *детектор ультрафиолетового излучения Солнца;* 10 – *радиометры с ограничителями избирательного действия*

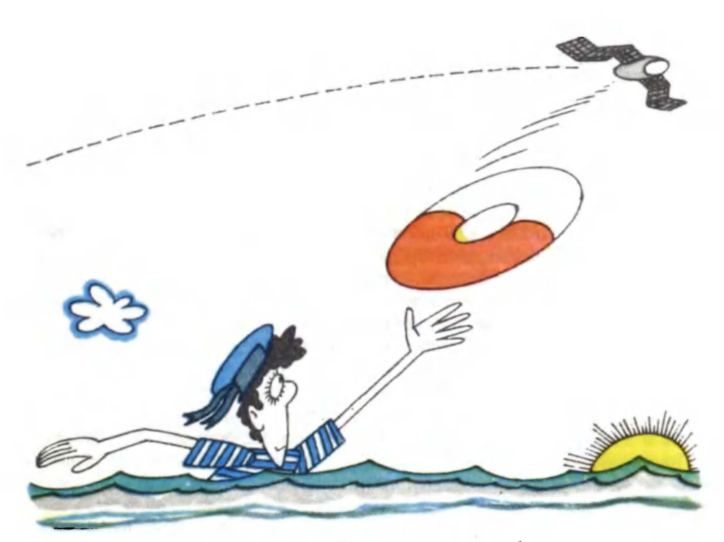
метеорологов? На рисунке показан один из метеорологических спутников. Большие панели солнечных элементов устанавливаются перпендикулярно направлению на Солнце и обеспечивают электропитание аппаратуры и подзаряд аккумуляторов, включаемых в работу на ночной стороне Земли. Число элементов более 10000, а мощность энергетической установки около 0,5 кВт. В нижней части конструкции размещена платформа с аппаратурой. Система ориентации с ИК датчиками горизонта всегда разворачивает спутник так, чтобы платформа была обращена к Земле.

Спутник выводится на приполярную круговую орбиту высотой 1100 км и наклонением к плоскости экватора 80°. С этой орбиты спутник дважды за сутки «осматривает» практически всю поверхность Земли, ведь плоскость орбиты в пространстве сохраняет ориентацию, а Земля поворачивается в соответствии с суточным вращением вокруг оси.

Основное оборудование спутника – три телевизионные камеры с разрешающей способностью на поверхности Земли 900 м. Сигналы камер записываются на бортовой видеомагнитофон и передаются на Землю при пролете спутника в зоне радиовидимости со станции слежения. Четвертая телевизионная камера с худшей разрешающей способностью (3,2 км) непрерывно передает изображение Земли для



Расположение спутников системы «Метеор» на орбите (спутник слева ведет телевизионную, спутник справа – инфракрасную съемку)



Спутники помогают в обнаружении кораблекрушений

любых возможных пользователей. В ночное время изображение облачного покрова Земли получают сканирующим ИК радиометром, работающим в диапазоне длин волн 3,4...4,2 мкм. Всего же на спутнике установлено 11 различных метеорологических приборов. Полный объем информации, «сбрасываемой» за один сеанс связи со спутником, может достигать 150 Мбит.

Перед прогнозом погоды в последних известиях по телевидению и радио иногда сообщают и о стихийных бедствиях, авариях судов и самолетов. Несмотря на наличие самых современных технических средств навигации, число аварий остается значительным: ежегодно в результате кораблекрушений, столкновений и пожаров гибнут сотни судов. Спасение терпящих бедствие остается важнейшей межгосударственной задачей. И здесь свой немалый вклад вносит космическая радиоэлектроника. Запуском советского ИСЗ «Космос-1383» 30 июня 1982 года завершился первый этап создания космической системы поиска аварийных судов и самолетов. Она названа по начальным буквам слов – КОСПАС. Параллельно в США, Канаде и Франции создана аналогичная спутниковая система САРСАТ. Оба проекта объединяются в совместную систему КОСПАС – САРСАТ. Как же действует эта система?

Каждое судно, самолет или другой объект оснащаются небольшими аварийными радиопередатчиками, работающими на специально отведенных для этой цели частотах 121,5 и 406 МГц метрового и дециметрового диапазонов волн. Передатчик включается в случае аварии и автоматически посылает сигнал бедствия на один из ИСЗ, периодически появляющихся в зоне радиовидимости из любой точки поверхности планеты. Принятый спутником сигнал некоторое время хранится в бортовом запоминающем устройстве и при пролете спутника над пунктом приема информации «сбрасывается» уже на частоте линии связи со спутником 1544,5 МГц. Пункты приема, оснащенные отечественной аппаратурой, развернуты в Москве, Архангельске, Владивостоке и Новосибирске. Пункты соединены кана-

лами связи с координационным центром КОСПАС. В его функции входят обработка данных и оповещение поисково-спасательных служб соответствующих стран.

Одновременно с приемом сигнала с ИСЗ определяются и координаты терпящего бедствие объекта, что и обеспечивает быстрое и эффективное оказание помощи. Простейшие аварийные радиобуи АРБ-121,5 передают в эфир немодулированный сигнал на частоте 121,5 МГц. Таких буев установлено уже несколько сотен тысяч. Даже немодулированного сигнала достаточно, чтобы бортовая спутниковая аппаратура определила координаты буя с точностью до 20 км по доплеровскому сдвигу частоты. Этого вполне достаточно, поскольку бортовые приемники-пеленгаторы поисковых судов и самолетов могут принять сигнал буя с расстояния в 30 км. Более совершенно устройство радиобуя АРБ-406. Он оснащен двумя передатчиками, один из которых на частоте 406 МГц посылает сигнал на спутник, а другой, работающий на частоте 121,5 МГц, служит «приводным маяком» для пеленгаторов спасательных средств. На радиобуе имеется и запоминающее устройство, хранящее основную информацию: название судна, государственную принадлежность, координаты, характер аварии. Эта информация передается на ИСЗ и далее – в координационный центр.

Сразу после запуска ИСЗ «Космос-1383» продемонстрировал высокую эффективность системы. Только за первые три месяца работы удалось спасти жизнь двенадцати гражданам Канады, США и Англии. Журнал «Тайм» писал о «чуде космического века». 24 марта 1983 года к первому советскому спутнику-спасателю присоединился второй, «Космос-1447», а 28 марта – американский ИСЗ NOAA-8. Через год на счету космической системы были сотни спасенных жизней, и более 20 стран выразили желание присоединиться к ней.

Немалую роль играют ИСЗ и в деле пополнения наших знаний о геологических, гидрофизических, агробиологических и многих других характеристиках поверхности Земли. Как вы думаете, что раньше было на месте пустыни Сахара? Сейчас – это огромное море

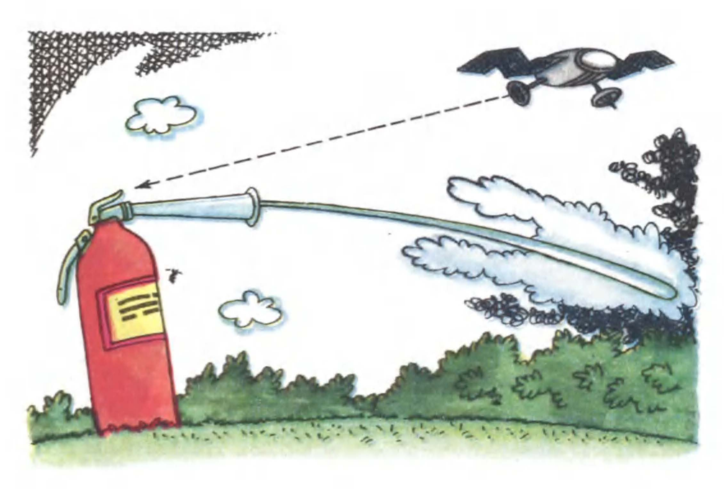


Спутники помогают обнаруживать полезные ископаемые,

песка, кое-где перемежаемого выходами коренных горных пород. Однажды с одной из АМС, удалившейся на расстояние нескольких десятков тысяч километров, было передано телевизионное изображение Земли. Мелких деталей на нем уже не было заметно, а только что упомянутые выходы горных пород оказались расположенными правильным кольцом и очерчивали контуры гигантского древнего горного цирка. О его существовании и не подозревали. Надо было удалиться в космос, чтобы увидеть это древнее геологическое образование. Аналогичные кольцевые структуры были обнаружены и на снимках, сделанных с орбитальных станций. Они помогли геологам найти новые месторождения меди. Снимки Ферганской долины, полученные нашими космонавтами на пилотируемых орбитальных станциях, помогли геологам правильно расположить разведочные буровые скважины, что сэкономило миллионы рублей, ведь каждая скважина обходится очень недешево!

Имеется много других примеров чрезвычайной ценности космической информации о Земле. Когда густоту цвета на снимке Каспийского моря сопоставили с картой глубин, получили почти точное совпадение. А один снимок Аральского моря позволил сразу установить степень его обмеления из-за расхода воды рек Сыр-Дарьи и Аму-Дарьи на орошение поливных среднеазиатских земель. Один снимок заменил работу многих экспедиций!

В сельском хозяйстве сразу оценили выгоду использования спутниковой информации. На обнаружение вспышек заболеваний сельскохозяйственных культур и их поражения вредителями исследовательская служба США тратит ежегодно 3 млн. долларов. Ту же работу можно выполнить гораздо дешевле, используя космические снимки. Поля изменяют цвет в зависимости от состояния культуры и степени ее созревания. Важно и то, что контроль ведется не выборочно, на отдельных участках полей, а сразу по всей площади. Правильное определение сроков созревания крайне важно, поскольку снижение потерь урожая только на 1% выражается для США суммой в размере 75 млн. долларов. В одной только Калифорнии в 1970 году сэкономили 5 млн. долларов благодаря использованию



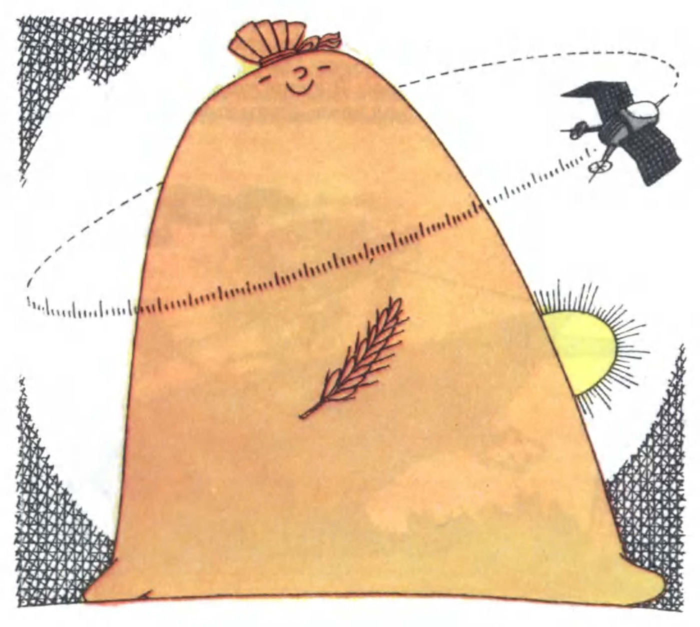
... пожары,

космической информации для определения степени зрелости винограда.

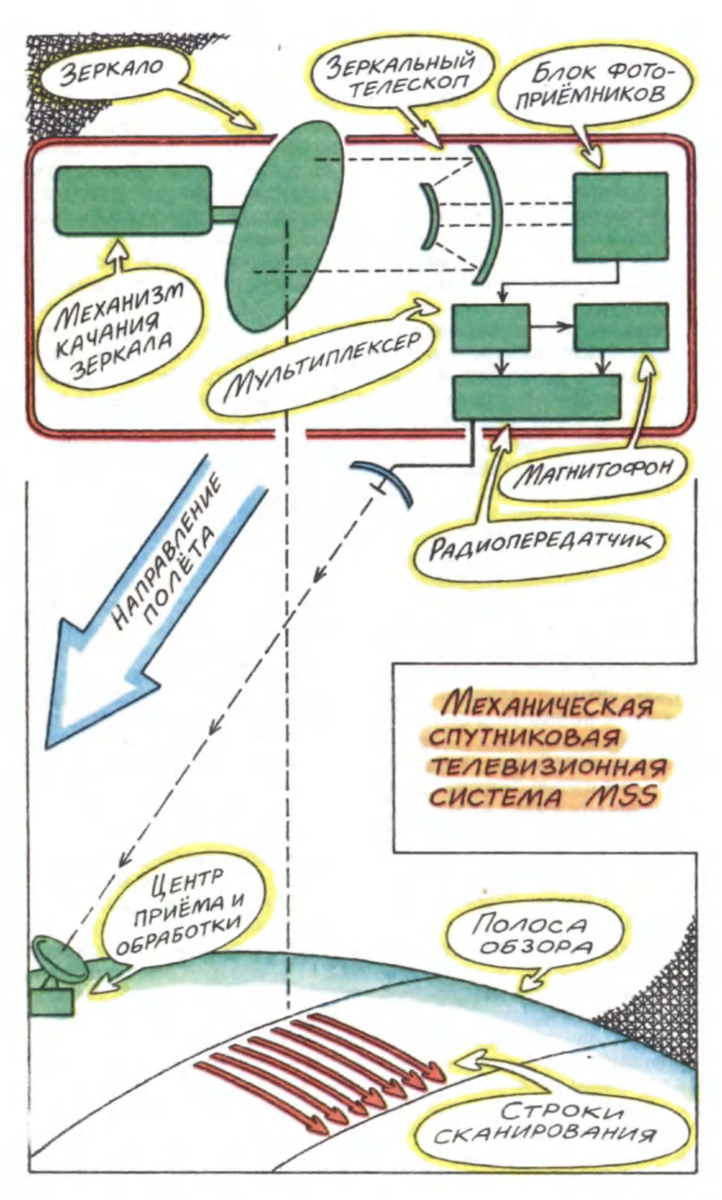
С орбиты ИСЗ очень хорошо видны лесные пожары, а своевременное их обнаружение очень важно.

Столь очевидные выгоды привели к разработке специализированного спутника для изучения и исследования природных ресурсов. Такой спутник ERTS-1 был запущен в США в 1972 году. Это довольно тяжелый спутник весом около тонны, диаметром 3,05 и высотой 3,35 м. Конструкция его во многом напоминает уже описанный метеорологический ИСЗ, и орбита имеет похожие параметры. Спутник ERTS-1 был оснащен тремя телевизионными камерами электронного телевидения RBV с видиконами в качестве фотоприемников и многоканальной оптико-механической телевизионной камерой MSS. Надо сказать, что электронное телевидение в космосе себя не оправдало, и камеры RBV вышли из строя сразу после запуска из-за пробоя высоковольтной изоляции. Зато система механического телевидения работала более года и буквально «засыпала» информацией центр обработки, с лихвой окупив все затраты. Надо отметить, что из-за обилия информации полностью удавалось обрабатывать всего лишь 20% получаемых снимков.

Остановимся подробнее на системе механического телевидения MSS, которую часто называют сканером. Она «нацелена» в одну точку на поверхности Земли, но благодаря качающемуся зеркалу эта точка перемещается по строке поперек направления движения спутника. Ширина строки составляет на поверхности Земли 185 км (100 миль). «Сняв» одну строку, сканер «прочерчивает» следующую, но весь ИСЗ успевает за это время немного продвинуться вперед по



... степень зрелости сельскохозяйственных культур



Механическая спутниковая телевизионная система MSS

орбите, осуществляя развертку кадра. Качающееся зеркало совершает 15,2 колебаний в секунду. Угол качания составляет всего $\pm 2{,}9°$. Во время рабочего хода для большей плавности зеркало движется по инерции, а ударившись о демпферы, возвращается в исходное положение электромагнитом. Это эллиптическое зеркало с размерами 23 × 23 см было изготовлено из полированного бериллия с серебряным покрытием.

Свет, отраженный качающимся зеркалом, попадает в зеркальную телескопическую систему Кассегрена диаметром 23 см, которая фокусирует его на волоконно-оптическую систему, распределяющую свет по фотодетекторам. Каждое качание зеркала дает сразу шесть строк изображения, снимаемых шестью системами фотодетекторов. А каждая система содержит четыре фотодетектора, рассчитанные на разные диапазоны спектра: 0,5...0,6 мкм (сине-зеленый), 0,6...0,7 мкм (красно-желтый), 0,7...0,8 мкм (красный) и 0,8...1,1 мкм (инфракрасный). Таким образом, всего в камере 24 световода и 24 фотоприемника.

Видеосигналы камеры MSS преобразуются в цифровую форму бортовым мультиплексером со скоростью 15 Мбит/с. Используются шестиразрядные слова-байты. Каждый формат (как бы предложение) содержит 25 слов: первое для синхронизации, остальные 24 для передачи данных от фотоприемников. Видеосигналы в цифровой форме либо сразу передаются на Землю, либо записываются бортовым магнитофоном, чтобы быть переданными потом, при пролете над станцией слежения.

Описанная система позволила получить очень хорошее разрешение на местности: около 60...70 м. На снимках, которые воспроизводятся в виде квадратных кадров размером 100 × 100 миль, можно рассмотреть отдельные корабли в океане или стоящие у причалов, шоссейные и железные дороги, строения, отдельные группы деревьев. После геометрической коррекции искажений и привязки к опорным точкам на местности снимки вполне могут использоваться для целей картографии.

На спутнике установлена и еще одна интересная система сбора информации с наземных и морских платформ. Платформы устанавливают в удаленных и труднодоступных местах, и они регистрируют сейсмические колебания, а главным образом – метеорологические данные. С помощью морских плавающих платформ – буев собираются данные о ветре, волнении, прохождении катастрофических волн цунами, метеопараметрах атмосферы и т. д. Каждая платформа оборудована небольшими радиопередатчиком и дежурным приемником. Спутник, дважды в сутки пролетая над каждой платформой, посылает сигнал запроса, по которому включается передатчик, и накопленная информация в цифровом виде передается на спутник. Данные со всех платформ накапливаются и передаются спутником в центр обработки.

Если линия связи платформа – спутник узкополосна и имеет пропускную способность не более 0,1 кбит/с, работая на частоте 401,9 МГц, то линия передачи данных со спутника на центр обработки должна пропускать очень большой объем информации. Передача ведется на волнах десятисантиметрового диапазона со скоростью 15 Мбит/с. Полоса частот основного и резервного каналов связи достигает 20 МГц. Дополнительно спутник имеет командный служебный радиоканал, который предназначен для управления его системами и работает в диапазоне МВ.

На этом закончим рассказ о первом (и самом простом) ИСЗ для исследования природных ресурсов. Сейчас разрабатываются и ис-

пользуются более сложные и совершенные спутники и системы. Сообщалось, например, о разработке сканера, работающего в 24 спектральных диапазонах от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области. Все шире используется всепогодная радиометрическая и радиолокационная аппаратура. Радиометр (приемник собственного теплового радиоизлучения Земли), работающий на сантиметровых волнах, позволяет обнаруживать очаги лесных пожаров и вулканической деятельности, составлять карты сельскохозяйственных угодий и определять влажность почвы. Он оказался незаменимым в ледовой разведке, ведь кажущаяся яркостная температура льда оказалась почти на 100° выше температуры открытой воды. Еще большие возможности имеет радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой. Облака для этих приборов не помеха.

Много аппаратуры для исследования природных ресурсов и решения других народнохозяйственных задач размещается на отечественных ИСЗ «Метеор – Природа», регулярно запускаемых и эксплуатируемых с 1978 года. Они созданы на базе метеорологического спутника «Метеор», но существенно отличаются от него составом аппаратуры, параметрами орбиты и другими данными.

Искусственные спутники Земли для исследования природных ресурсов запускают на синхронно-солнечные орбиты. При таких орбитах ИСЗ пролетает над каждой точкой земной поверхности в одно и то же местное время. Высота Солнца при съемке остается одной и той же. Это дает возможность наблюдать поверхность в одинаковых условиях и легко выявлять произошедшие изменения ее состояния (например, появление всходов, их созревание, изменение береговой линии рек, озер и водохранилищ и т. д.). Высота орбит составляет около 650 км при угле наклонения около 98°, т. е. спутник пролетает и через полярные области планеты.

Основной аппаратурой для съемки поверхности Земли остается многоспектральная телевизионная аппаратура с механическим сканированием. Но уже имеются разработки приборов и с электронным сканированием. В них используются линейка светоприемников и интегральное электронное устройство сканирования, выполненное на приборах с зарядовой связью. Принцип действия линеек состоит в том, что по мере поступления тактовых импульсов «считывается» заряд с каждой из последующих ячеек-фотоприемников и таким образом разворачивается строка изображения. Используют как системы низкого разрешения, позволяющие наблюдать крупномасштабные образования при ширине полосы обзора 2100...2400 км, так и системы среднего и высокого разрешений для получения детальных изображений.

Космическая информация широко используется в народном хозяйстве нашей страны. Созданы, например, геологические карты в масштабах 1:2 500 000 и 1:5 000 000, которые невозможно было бы создать в сжатые сроки другими методами. Немало народнохозяйственной аппаратуры устанавливают на орбитальных космических станциях. Вот, например, состав такой аппаратуры: многоспектральная аэрофотокамера; ИК спектрометр; многоканальный сканер; СВЧ радиометр и измеритель коэффициента отражения от земных покровов (скаттерометр) трехсантиметрового диапазона; СВЧ радиометр диапазона ДМВ.

Существуют и другие разработки. Например, метеорологический спутник на геостационарной орбите. Он не только каждые 20 мин получает и передает в центр обработки изображение облачного покрова видимой половины Земли, но служит еще и ретранслято-

ром. Обработанные снимки снова передаются на спутник, а оттуда ретранслируются любым возможным пользователям информации.

Рассказ о спутниках и межпланетных станциях можно продолжать до бесконечности, но тогда и эта книга никогда не имела бы конца. Так что лучше вовремя остановиться, а те из читателей, кто заинтересуется космической электроникой, могут прочитать о ней в популярных или научных изданиях.

Заключение

Приступая к работе над этой книгой, я надеялся познакомить читателей, если не со всеми, то, во всяком случае, со многими аспектами современной радиоэлектроники. По мере работы и особенно с приближением к ее завершению становилось все яснее, что полностью решить поставленную задачу не удается. Электроника проникла в такое множество отраслей научной и производственной деятельности, что даже их простое перечисление оказывается практически невозможным. Еще труднее отразить современное состояние дел в радиоэлектронике. Прогресс настолько стремителен, что сведения, которыми мы располагали вчера, сегодня становятся безнадежно устаревшими.

Только что узнал: установлен новый рекорд дальности связи по волоконно-оптическому каналу – 200 км без промежуточных усилителей; на одном самолете полностью отказались от соединительных проводов и заменили их оптическим волокном; на одном кристалле площадью несколько квадратных сантиметров сделали микропроцессор с памятью объемом в четверть миллиона бит информации... И подобные сообщения поступают непрерывно.

Как же быть? Может быть, базнадежно и пытаться изучать радиоэлектронику – все равно за современными достижениями не угонишься? Нет, дорогой читатель, все совсем не так. Речь идет не о гонке и не о соревновании, а о вашем посильном вкладе в общее дело совершенствования техники и технологии. Радиоэлектроника – увлекательнейшее дело и необъятное поле приложения ваших сил и знаний. Многие люди беззаветно служили радиоэлектронике. Наверное, они были очень счастливыми людьми, ибо испытали самое высшее наслаждение, которое только доступно человеку, – наслаждение творческой работой.

Вдумайтесь в эти слова, читатель, и, может быть, вы припомните моменты из собственной жизни, когда испытывали что-то подобное. Процесс творческого познания в самом себе несет удовлетворение для человека. Пока интересно – изучайте, пока есть желание – экспериментируйте! Радиолюбитель с паяльником и ученый перед сложнейшим компьютером едины в одном: они заняты творческой деятельностью. Если вы и не достигнете уровня всемирно известных ученых – не беда. Вы внесете посильный вклад своей творческой деятельностью в создание общества будущего.

Вот что писал Б. К. Шембель, один из столпов отечественной радиотехники, молодым читателям: «В работе не бойтесь трудных тем... Пристально и настойчиво изучая вопрос, вы обязательно найдете в нем новое, интересное, а иногда очень важное. А чем больше вы вложите труда в вашу работу, тем ближе она вам будет,

тем большее удовлетворение вы получите от решения поставленной задачи». Лучше сказать трудно. Любое познание, любое приобретение опыта есть самоусовершенствование, любое самостоятельное решение встающих перед вами проблем есть творчество.

Список условных сокращений, принятых в книге

АЛС – автоматическая лунная станция
АМ – амплитудная модуляция
АМС – автоматическая межпланетная станция
БИС – большая микроинтегральная схема
ВОЛС – волоконная оптическая линия связи
ВУ – видеоусилитель
ВЧ – высокая частота
ГВЧ – генератор высокой частоты
ГКР – генератор кадровой развертки
ГСР – генератор строчной развертки
ДВ – длинные волны
ДМВ – дециметровые волны
ЗУ – запоминающее устройство
ИК – инфракрасный
ИКО – индикатор кругового обзора
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КА – космический аппарат
КВ – короткие волны
КМОП – комплементарная структура металл – окисел – полупроводник
МОП – структура металл – окисел – полупроводник
МПЧ – максимальная применимая частота
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ПАВ – поверхностные акустические волны
ПЗС – прибор с зарядовой связью
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ПТК – переключатель телевизионных каналов
РЛС – радиолокационная станция
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВ – средние волны
СВЧ – сверхвысокая частота
СМВ – сантиметровые волны
УЗЧ – усилитель звуковой частоты
УКВ – ультракороткие волны
УНЧ – усилитель низкой частоты
УПЧ – усилитель промежуточной частоты
УРЧ – усилитель радиочастоты
ЧМ – частотная модуляция
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка

Оглавление

Научно-популярное издание

ПОЛЯКОВ ВЛАДИМИР ТИМОФЕЕВИЧ

ПОСВЯЩЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ

Научный редактор В. М. Богачев
Редактор издательства И. Н. Суслова
Обложка художника А. С. Дзуцева
Иллюстрации художника Е. С. Шабельника
Художественный редактор Н. С. Шеин
Технический редактор Г. З. Кузнецова
Корректор Т. Л. Кускова

ИБ № 1486

Сдано в набор 28.05.87 Подписано в печать 31.12.87 Т—25518 Формат 84×108/ 32 Бумага офсетная № 1 Гарнитура таймс Печать офсетная Усл. печ. л. 18,48 Усл. кр.-отт. 74,34 Уч. изд. л 22,64 Тираж 900.000 (5-й завод 600 001—700 000, издательство «Судостроение») экз. Изд. № 21726 Зак. № 647 Цена 2 р. 40 к. Издательство «Радио и связь», 101000 Москва, Почтамп, а/ я 693.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
г. Можайск, ул. Мира, 93.

Цена 2 р. 40 к.

МРБ

В. Т. Поляков

Посвящение в радиоэлектронику

Издательство «Радио и связь»